



TUGAS AKHIR - TM141585

**ANALISIS KESALAHAN PENGUKURAN KECEPATAN AKIBAT
DISTORSI LENSEA**

YUDHA HARDHIYANA PUTRA
NRP 2108 100 132

Dosen Pembimbing
Ir. Yusuf Kaelani, M.Sc.E

JURUSAN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2016



FINAL PROJECT - TM141585

***ANALYSIS OF VELOCITY MEASUREMENT ERROR DUE TO
LENS DISTORTION***

**YUDHA HARDHIYANA PUTRA
NRP 2108 100 132**

Academic Supervisor
Ir. Yusuf Kaelani, M.Sc.E

***MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya
2016***

ANALISIS KESALAHAN PENGUKURAN KECEPATAN AKIBAT DISTORSI LENS

TUGAS AKHIR

**Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada**

**Program Studi S-1 Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

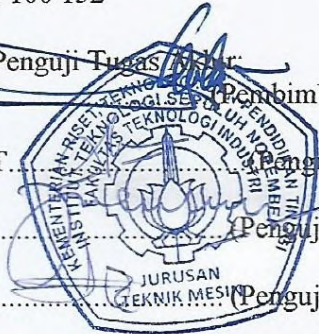
Oleh:

YUDHA HARDHIYANA PUTRA

Nrp. 2108 100 132

Disetujui Oleh Pembimbing dan Penguji Tugas Akhir

1. Ir. Yusuf Kaelani, M.Sc.E..... (Pembimbing)
(NIP. 196511031990021001)
2. Aida Annisa Amin D., ST, MT..... (Penguji I)
(NIP. 198907052015042005)
3. Ir. Julendra B. Ariatedja, MT..... (Penguji II)
(NIP. 196807061999031004)
4. Moch. Solichin, ST, MT..... (Penguji III)
(NIP. 198908172015041003)



SURABAYA

Juli 2016

ANALISIS KESALAHAN PENGUKURAN KECEPATAN AKIBAT DISTORSI LENSA

Nama Mahasiswa : Yudha Hardhiyana Putra
NRP : 2108 100 132
Jurusan : Teknik Mesin FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Ir. Yusuf Kaelani, M.Sc.E

Abstrak

Beberapa penelitian telah dilakukan tentang metode baru pengukuran kecepatan dengan bantuan kamera. Namun, penelitian-penelitian tersebut mengabaikan sifat kamera yang mungkin menghasilkan proyeksi gambar melengkung dari pengambilan suatu objek bidang datar. Dalam dunia fotografi, fenomena tersebut dikenal dengan istilah distorsi. Gambar yang terdistorsi tentunya merugikan jika digunakan sebagai piranti untuk mengukur kecepatan. Hal ini terjadi karena efek distorsi bisa mengurangi tingkat ketepatan pengukuran.

Pada penelitian ini dilakukan analisis kesalahan pengukuran kecepatan dengan perekaman video terhadap partikel (kereta api mainan) yang bergerak lurus. Kecepatan partikel ini telah diketahui dan dijaga konstan. Video yang dihasilkan kemudian di-extract menjadi rangkaian gambar. Koordinat-koordinat titik pada rangkaian gambar tersebut merupakan bahan untuk analisis perpindahan. Data perpindahan selanjutnya diolah untuk analisis kecepatan sesaat. Hasil analisis kecepatan sesaat kemudian dibandingkan dengan kecepatan konstan partikel guna mengetahui sejauh mana keakuratan metode penelitian ini. Selain itu, dilakukan juga analisis distorsi untuk mengetahui seberapa besar distorsi yang berlaku pada beberapa focal length.

Hasil yang diperoleh dari penelitian ini menunjukkan bahwa tingkat kesalahan pengukuran kecepatan partikel dengan focal length 22 mm cenderung lebih kecil daripada saat menggunakan focal length 10 mm. Di sisi lain, distorsi lensa yang

berlaku pada focal length 22 mm juga jauh lebih kecil. Maka dapat disimpulkan bahwa distorsi dan tingkat kesalahan memiliki korelasi yang berbanding lurus. Semakin kecil distorsi yang berlaku pada suatu focal length, semakin kecil pula kesalahan pengukuran yang terjadi. Dengan demikian, focal length 22 mm relatif aman digunakan untuk pengukuran kecepatan dengan bantuan kamera.

Kata kunci: tingkat kesalahan, pengukuran kecepatan, distorsi, kamera, focal length.

ANALYSIS OF VELOCITY MEASUREMENT ERROR DUE TO LENS DISTORTION

Student Name : Yudha Hardhiyana Putra
Registration Number : 2108 100 132
Department : Mechanical Engineering FTI-ITS
Academic Supervisor : Ir. Yusuf Kaelani, M.Sc.E

Abstract

There have been some researches about new method of velocity measurement by using camera. Yet, those researches ignore a camera characteristic that may produce bending image projection from a planar object shot. In term of photography, this phenomenon is known as distortion. Distorted images are surely disadvantageous if they are used as media for measuring velocity. It is because the effect of distortion can decrease the measurement accuracy.

In this research, analysis of velocity measurement error is done by recording videos toward a straight moving particle (toy train). The particle's velocity is known and maintained constant. After that, those videos are extracted into image sequences. Particle's coordinates on the image sequences are the materials for displacement analysis. Next, the data of displacement are processed for split-second velocity analysis. The data of split-second velocity are then compared with particle's constant velocity to find out how accurate the method is. In addition, distortion analysis is also conducted to discover the distortion value occurs on some focal lengths.

Results obtained from this research show that the error rate of particle velocity measurement using 22 mm focal length is slighter than using the 10 mm. On the other hand, lens distortion occurs in 22 mm focal length is also much smaller. So it can be inferred that distortion and error rate have a direct correlation. The smaller distortion occurs on a focal length, the slighter

measurement error will be. Therefore, 22 mm focal length is relatively safe to be used for camera aided velocity measurement.

Keywords: error rate, velocity measurement, distortion, camera, focal length.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
LEMBAR PENGESAHAN	
ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xi
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang Masalah.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan Penelitian.....	4
1.5 Manfaat Penelitian.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Penelitian Terdahulu	5
2.2 Pembiasan Cahaya pada Lensa.....	7
2.2.1 Lensa Cembung.....	8
2.2.2 Lensa Cekung.....	9
2.3 Kamera DSLR (Digital Single Lens Reflex).....	10
2.3.1 Lensa Kamera DSLR	11
2.3.2 Crop Factor.....	12
2.3.3 Frame Rate	13
2.3.4 Kualitas Video.....	14
2.3.5 Focal Length dan Angle of View	14
2.3.6 Distorsi	17
2.4 Sistem Koordinat Cartesius	18
2.5 Vektor.....	19
2.5.1 Posisi	20
2.5.2 Perpindahan	21
2.5.3 Kecepatan	21
2.5.4 Percepatan dan Perlambatan.....	22
2.6 Transformasi Rotasi Tiga Dimensi.....	23

2.6.1	Rotasi Terhadap Sumbu X.....	24
2.6.2	Rotasi Terhadap Sumbu Y.....	25
2.6.3	Rotasi Terhadap Sumbu Z.....	26
BAB III METODOLOGI		
3.1	Diagram Alir.....	27
3.1.1	Diagram Alir Pengambilan Data	27
3.1.2	Diagram Alir Perhitungan	28
3.2	Peralatan dan Bahan	32
3.1.1	Peralatan	32
3.1.2	Bahan.....	32
3.3	Prosedur Penelitian.....	32
BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN		
4.1	Analisis Gambar	43
4.1.1	Skala	43
4.1.2	Kecepatan Universal (\tilde{V}_u)	44
4.1.3	Koordinat Posisi	45
4.2	Analisis Data	46
4.3	Pembahasan	48
4.3.1	Gerakan dengan Kecepatan Konstan pada Focal Length 10 dan 22 mm.....	48
4.3.2	Gerakan dengan Percepatan dan Perlambatan pada Focal Length 10 dan 22 mm.....	52
4.3.3	Distorsi pada Focal Length 10 dan 22 mm.....	54
4.4	Pemodelan Efek Distorsi	57
4.4.1	Pemodelan Efek Distorsi Focal Length 10 mm.....	59
4.4.2	Pemodelan Efek Distorsi Focal Length 22 mm.....	60
BAB V PENUTUP		
5.1	Kesimpulan.....	61
5.2	Saran.....	61
DAFTAR PUSTAKA		63
LAMPIRAN		65

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Proyeksi Pengambilan Gambar Objek Bidang Datar	2
Gambar 1.2	Pergerakan Objek terhadap Kamera	3
Gambar 2.1	Pembiasan Cahaya pada (a) Lensa Cembung Tebal dan (b) Lensa Cembung Tipis	7
Gambar 2.2	Klasifikasi Lensa Cembung	8
Gambar 2.3	Pembiasan Cahaya pada Lensa Cembung	8
Gambar 2.4	Sifat-sifat Khusus Pembiasan Cahaya pada Lensa Cembung	9
Gambar 2.5	Klasifikasi Lensa Cekung	9
Gambar 2.6	Pembiasan Cahaya pada Lensa Cekung	10
Gambar 2.7	Sifat-sifat Khusus Pembiasan Cahaya pada Lensa Cekung	10
Gambar 2.8	Mekanisme Kamera DSLR.....	11
Gambar 2.9	Elemen-elemen Lensa Kamera DSLR.....	12
Gambar 2.10	<i>Crop Factor</i> pada Beberapa Jenis Kamera	13
Gambar 2.11	<i>Focal Length</i>	14
Gambar 2.12	Ilustrasi <i>Focal Length</i> dan <i>Angle of View</i>	15
Gambar 2.13	<i>Focal Length</i> dan <i>Angle of View</i> pada Kamera DSLR APS-C 1.6	16
Gambar 2.14	Penampakan Distorsi (a) <i>Barrel</i> , (b) <i>Pincushion</i> , dan (c) <i>Mustache</i>	17
Gambar 2.15	(a) Sistem Koordinat Tangan Kanan dan (b) Sistem Koordinat Tangan Kiri	19
Gambar 2.16	Sistem Tangan Kanan yang Dimodifikasi	19
Gambar 2.17	Vektor Posisi pada Koordinat Cartesius	20
Gambar 2.18	Vektor Perpindahan Suatu Titik	21
Gambar 2.19	Rotasi terhadap (1) sumbu X, (2) sumbu Y, dan (3) sumbu Z.....	23
Gambar 2.20	Rotasi Searah Jarum Jam terhadap Sumbu X	24
Gambar 2.21	Rotasi Searah Jarum Jam terhadap Sumbu Y	25
Gambar 2.22	Rotasi Searah Jarum Jam terhadap Sumbu Z.....	26
Gambar 3.1	Diagram Alir Pengambilan Data	28

Gambar 3.2	Diagram Alir Perhitungan Tingkat Kesalahan (<i>Error Rate</i>)	29
Gambar 3.3	Diagram Alir Perhitungan Percepatan Sesaat ...	30
Gambar 3.4	Diagram Alir Perhitungan Distorsi	31
Gambar 3.5	Pengaturan <i>Focal Length</i>	33
Gambar 3.6	Jarak antara Kamera dan Objek	34
Gambar 3.7	Posisi Mistar	35
Gambar 3.8	Rangkaian Gambar	36
Gambar 3.9	Ilustrasi Titik Acuan	37
Gambar 3.10	Titik z_0	39
Gambar 3.11	Sudut θ	40
Gambar 3.12	Ilustrasi Posisi z_a'	41
Gambar 4.1	Mistar Kayu dalam Posisi Horizontal	43
Gambar 4.2	Grafik Kecepatan Sesaat Konstan – Dekat pada <i>Focal Length</i> 10 mm	48
Gambar 4.3	Grafik Kecepatan Sesaat Konstan – Jauh pada <i>Focal Length</i> 10 mm	49
Gambar 4.4	Grafik Kecepatan Sesaat Konstan – Dekat pada <i>Focal Length</i> 22 mm	50
Gambar 4.5	Grafik Kecepatan Sesaat Konstan – Jauh pada <i>Focal Length</i> 22 mm	51
Gambar 4.6	Grafik Kecepatan Sesaat pada Percepatan dan Perlambatan <i>Focal Length</i> 10 mm	52
Gambar 4.7	Grafik Kecepatan Sesaat pada Percepatan dan Perlambatan <i>Focal Length</i> 22 mm	53
Gambar 4.8	Proyeksi Distorsi pada <i>Focal Length</i> 10 mm	54
Gambar 4.9	Distorsi <i>Focal Length</i> 10 mm	55
Gambar 4.10	Proyeksi Distorsi pada <i>Focal Length</i> 22 mm	55
Gambar 4.11	Distorsi <i>Focal Length</i> 22 mm	56
Gambar 4.12	Skema Pemodelan Efek Distorsi	57
Gambar 4.13	Profil Efek Distorsi <i>Focal Length</i> 10 mm ($e = 1.3$)	59
Gambar 4.14	Profil Efek Distorsi <i>Focal Length</i> 22 mm ($e = 2.7$)	60

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Persentase <i>Error</i> pada Penelitian Wong Windra...	6
Tabel 2.2	Persentase <i>Error</i> pada Penelitian Adi Wahyu.....	6
Tabel 3.1	Koordinat X dan Y, nilai ΔX , dan nilai ΔY dalam Satuan Pixel.....	37
Tabel 4.1	Faktor Skala	44
Tabel 4.2	Data Kecepatan Universal pada <i>Focal Length</i> 10 mm.....	44
Tabel 4.3	Data Kecepatan Universal pada <i>Focal Length</i> 22 mm.....	44

(Halaman Ini Sengaja Dikosongkan)

BAB I

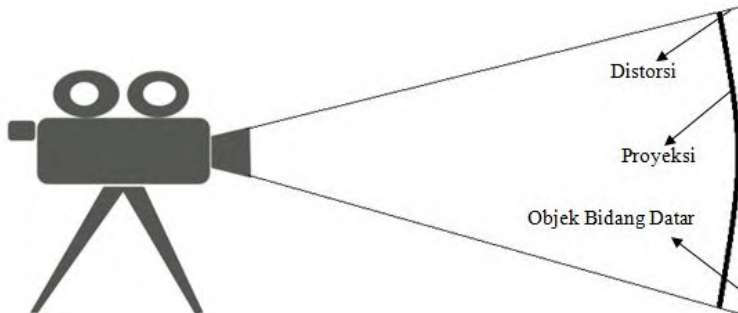
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Suatu benda dikatakan bergerak apabila kedudukannya berubah terhadap suatu acuan. Secara kinematis, benda yang bergerak pasti memiliki nilai perpindahan, kecepatan, dan percepatan. Namun, nilai-nilai tersebut terkadang sulit untuk diukur. Ada beberapa cara yang dapat dilakukan untuk mengetahui nilai kecepatan dan percepatan suatu benda, antara lain dengan penghitungan secara manual ataupun penggunaan alat ukur. Penghitungan secara manual memungkinkan terjadinya kesalahan pengukuran yang cukup besar. Sedangkan penggunaan alat ukur pun juga memiliki kelemahan, antara lain kemampuan khusus dari pengguna alat ukur tersebut dan keterbatasan kemampuan alat ukur itu sendiri.

Beberapa penelitian tentang metode baru pengukuran kecepatan telah dilakukan, antara lain pengukuran kecepatan dengan bantuan kamera. Penelitian-penelitian dengan metode tersebut telah dilakukan oleh Wong Windra Gunawan (2009) dalam tugas akhirnya yang berjudul "*Rancang Bangun Software Untuk Mengukur Kecepatan Dan Percepatan Sebuah Partikel Dengan Online Web Camera*" [1] dan Adi Wahyu Christianto (2013) dengan judul "*Mengukur Kecepatan Dan Percepatan Gerak Kaki Manusia Menggunakan Kamera Digital*" [2]. Pada penelitian yang dilakukan Wong Windra Gunawan, *web camera* digunakan untuk pengambilan gerakan partikel yang bergerak di atas *treadmill*. Hasil yang diperoleh berupa serangkaian gambar yang dapat digunakan sebagai alat untuk mengukur kecepatan dan percepatan partikel tersebut. Sedangkan penelitian Adi Wahyu Christianto menggunakan fitur video dari sebuah *compact digital camera*. Hasil yang didapat berupa file video yang kemudian di-*extract* dengan *software* menjadi serangkaian gambar yang berfungsi sama seperti penelitian Wong Windra Gunawan. Namun, kedua penelitian tersebut mengabaikan sifat kamera yang

menghasilkan proyeksi melengkung dari pengambilan gambar suatu objek bidang datar, seperti ilustrasi pada Gambar 1.1. Fenomena tersebut dalam dunia fotografi dikenal dengan istilah distorsi.



Gambar 1.1 Proyeksi Pengambilan Gambar Objek Bidang Datar

Dalam dunia fotografi, efek distorsi bisa menjadi hal yang menguntungkan. Namun, gambar yang terdistorsi tentunya merugikan jika digunakan sebagai piranti untuk mengukur kecepatan. Hal ini disebabkan karena efek distorsi bisa mengurangi tingkat ketepatan pengukuran seiring berubahnya posisi partikel yang menjauh dari bagian tengah gambar. Distorsi yang terjadi pun akan semakin besar seiring semakin pendeknya *focal length* yang digunakan. Sayangnya, hingga saat ini belum diketahui secara pasti nilai distorsi yang berlaku untuk tiap-tiap *focal length*.

Melihat fenomena tersebut, penulis ingin mencoba untuk menemukan tingkat kesalahan (*error rate*) pengukuran kecepatan dari pengamatan gambar dua dimensi serta nilai distorsi lensa yang terjadi pada beberapa *focal length*.

1.2 Perumusan Masalah

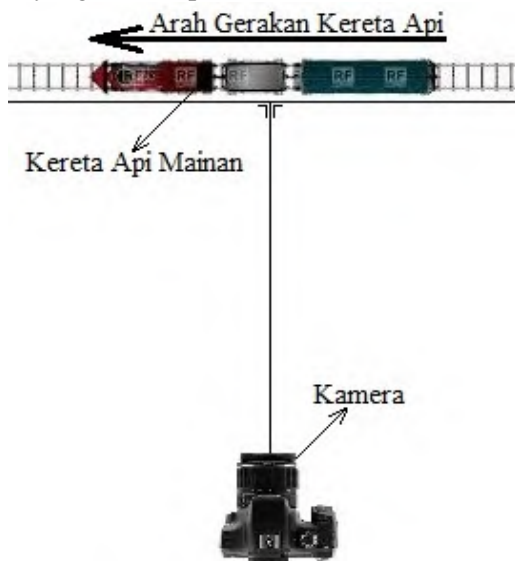
Permasalahan yang ingin diselesaikan dalam tugas akhir ini adalah bagaimana mendapatkan tingkat kesalahan (*error rate*) yang terjadi dalam pengukuran kecepatan dari pengamatan gambar dua dimensi terhadap objek tiga dimensi yang bergerak

lurus dengan kecepatan konstan pada suatu bidang datar. Pada tugas akhir ini dilakukan analisis kecepatan terhadap gerakan kereta api mainan dan distorsi yang terjadi pada *focal length* 10 mm dan 22 mm melalui gambar hasil kamera DSLR.

1.3 Batasan Masalah

Batasan-batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Objek yang digunakan adalah titik pada kereta api mainan
2. Objek bergerak dengan kecepatan konstan pada satu sumbu koordinat yang tegak lurus dengan kamera, seperti yang terlihat pada Gambar 1.2



Gambar 1.2 Pergerakan Objek terhadap Kamera

3. Kamera dalam keadaan tidak bergerak
4. Alat ukur berada tepat di tengah dan sejajar dengan kamera sehingga proyeksi alat ukur tidak mengalami distorsi

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dilakukannya penelitian ini antara lain:

1. Mengetahui tingkat kesalahan (*error rate*) pada alat ukur kecepatan partikel dengan kamera DSLR
2. Mengukur nilai distorsi lensa

1.5 Manfaat Penelitian

Hasil penelitian ini memiliki kontribusi antara lain:

1. Sebagai sarana koreksi terhadap penelitian-penelitian yang menggunakan kamera untuk analisis kinematika
2. Sebagai referensi dalam dunia fotografi, khususnya tentang *focal length* dan distorsi lensa

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Wong Windra Gunawan (2009) dalam tugas akhirnya yang berjudul “*Rancang Bangun Software Untuk Mengukur Kecepatan Dan Percepatan Sebuah Partikel Dengan Online Web Camera*” melakukan penelitian tentang pengukuran kecepatan dan percepatan sebuah partikel dengan bantuan *web camera*. Pengumpulan data dilakukan dengan mengambil serangkaian gambar pergerakan sebuah titik yang melekat pada salah satu anggota tubuh seseorang yang berjalan di atas *treadmill*. Serangkaian gambar tersebut menjadi bahan dalam penelitiannya merancang bangun *software* untuk mengukur kecepatan dan percepatan suatu partikel pada program Visual Basic. *Software* tersebut digunakan untuk menganalisis koordinat titik. Terdapat dua metode yang digunakan, yaitu *real-time* dan *offline*. Perbedaan antara kedua metode tersebut adalah proses pendeteksian koordinat titik. Pada metode *real-time*, tiap gambar yang dihasilkan langsung dideteksi koordinatnya. Sedangkan pada metode *offline*, pendeteksian koordinat dilakukan setelah serangkaian gambar dihasilkan. Titik dikatakan bergerak karena mengalami perpindahan posisi berdasarkan analisis tiap gambar. Data perpindahan posisi tersebut kemudian digunakan untuk analisis kecepatan partikel. Nilai kecepatan yang diperoleh melalui dua metode tersebut kemudian dibandingkan dengan kecepatan *treadmill*. Dari hasil penelitian Wong Windra Gunawan, metode pengukuran ini dapat digunakan untuk mengukur kecepatan partikel dengan tingkat kesalahan (*error rate*) yang berkisar antara 3.2-7.3%. Secara rinci, berdasarkan Tabel 2.1, tingkat kesalahan sebesar 7.3% pada kecepatan *treadmill* 1 km/h, 3.24% pada kecepatan *treadmill* 1.5 km/h, dan 5% pada kecepatan *treadmill* 2 km/h.

Tabel 2.1 Persentase *Error* pada Penelitian Wong Windra

$V_{\text{treadmill}}$	$V_{\text{real-time (cm/s)}}$	$V_{\text{offline (cm/s)}}$	$V_{\text{treadmill (cm/s)}}$	Error (%)
1 km/h	28.79	25.88	27.77	3.54 - 7.3
1.5 km/h	41.32	40.35	41.66	0.5 - 3.24
2 km/h	47.99	58.4	55.55	15.7 - 5

Penelitian berikutnya dilakukan oleh Adi Wahyu Christianto (2013) dalam tugas akhirnya yang berjudul “*Mengukur Kecepatan Dan Percepatan Gerak Kaki Manusia Menggunakan Kamera Digital*”. Dengan dasar pemikiran yang serupa, Adi Wahyu Christianto melakukan penelitian tentang pengukuran kecepatan gerak kaki manusia dengan bantuan fitur video dari sebuah *compact digital camera*. Hasil video kemudian di-*extract* menjadi serangkaian gambar yang juga diolah menggunakan software buatan pada program Visual Basic. Salah satu variabel pada penelitian Adi Wahyu Christianto sama dengan variabel penelitian Wong Windra Gunawan, yaitu gerakan manusia yang berjalan di atas *treadmill* dengan kecepatan 2 km/h. Dari hasil penelitian Adi Wahyu Christianto yang tersaji dalam Tabel 2.2, pengukuran kecepatan partikel pada objek yang bergerak di atas *treadmill* dengan kecepatan 2 km/h memiliki tingkat kesalahan hingga 13.8%.

Tabel 2.2 Persentase *Error* pada Penelitian Adi Wahyu

Frame	Xa	Ya	$\Delta Xa(\text{cm})$	$\Delta Ya(\text{cm})$	$V_{Xa}(\text{cm/s})$	$V_{Ya}(\text{cm/s})$	$Va(\text{cm/s})$	$V_{\text{treadmill (2 km/h)}}$	Error(%)
1	444	439	-1.8735711	0.23419639	-56.2071	7.025892	56.64455	55.55555556	1.96019
2	436	440	-1.8735711	-0.4683928	-56.2071	-14.0518	57.93699	55.55555556	4.28658
3	428	438	-1.6393747	0	-49.1812	0	49.18124	55.55555556	11.4738
4	421	438	-2.1077675	0	-63.233	0	63.23302	55.55555556	13.8194
5	412	438	-1.8735711	-0.2341964	-56.2071	-7.02589	56.64455	55.55555556	1.96019
6	404	437	-1.8735711	0	-56.2071	0	56.20713	55.55555556	1.17284
7	396	437	-1.6393747	-0.2341964	-49.1812	-7.02589	49.68056	55.55555556	10.575
8	389	436	-1.8735711	0.23419639	-56.2071	7.025892	56.64455	55.55555556	1.96019
9	381	437	-1.8735711	0.46839277	-56.2071	14.05178	57.93699	55.55555556	4.28658

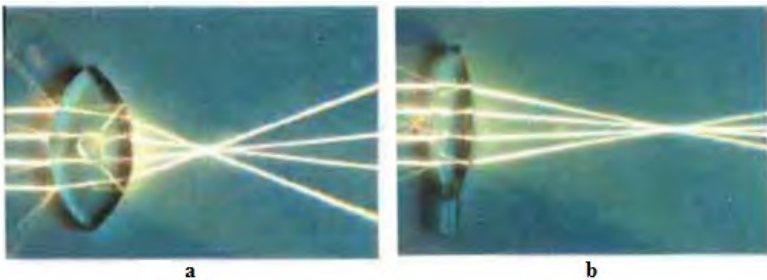
Dengan variabel yang sama, yaitu gerakan manusia yang berjalan di atas *treadmill* dengan kecepatan 2 km/h, penelitian Adi Wahyu Christianto memiliki tingkat kesalahan yang lebih besar daripada penelitian Wong Windra Gunawan. Faktor-faktor

yang mungkin berpengaruh terhadap tingkat kesalahan tersebut antara lain teknik pengambilan data, kemampuan kamera, kualitas gambar, dan pengabaian distorsi yang terjadi.

2.2 Pembiasan Cahaya pada Lensa

Pembiasan adalah peristiwa penyimpangan cahaya karena melalui dua medium yang memiliki perbedaan kerapatan optik. Penyimpangan tersebut terjadi akibat perubahan laju cahaya. Laju cahaya akan menurun ketika cahaya melalui medium dengan kerapatan optik yang tinggi. Perbandingan laju cahaya dalam ruang hampa dan laju cahaya dalam suatu zat disebut indeks bias.

Cahaya yang melalui sebuah lensa juga akan dibiaskan. Bahan suatu lensa akan berpengaruh pada nilai indeks bias. Karakteristik pembiasan cahaya bergantung pada indeks bias dan kelengkungan permukaan lensa. Karakteristik pembiasan cahaya dari dua kelengkungan permukaan lensa yang berbeda dapat dilihat pada Gambar 2.1. Kedua lensa terbuat dari bahan yang sama. Namun, lensa cembung tebal menghasilkan pembiasan cahaya yang lebar dan *focal length* yang pendek. Sedangkan lensa cembung tipis menghasilkan pembiasan cahaya yang sempit dan *focal length* yang panjang.



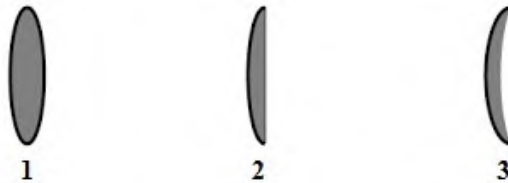
Gambar 2.1 Pembiasan Cahaya pada (a) Lensa Cembung Tebal dan (b) Lensa Cembung Tipis

Lensa adalah benda optik bening yang dibentuk sedemikian rupa sehingga mampu untuk membiaskan maupun meneruskan cahaya yang melaluinya. Lensa dibagi menjadi dua jenis, yaitu lensa cembung dan lensa cekung.

2.2.1 Lensa Cembung

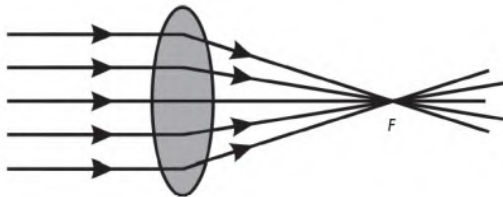
Lensa cembung adalah lensa yang bagian tengahnya lebih tebal daripada bagian tepinya. Gambar 2.2 menunjukkan bahwa lensa cembung dibagi menjadi tiga macam, yaitu:

1. Lensa bikonveks (cembung ganda), yaitu lensa yang kedua permukaannya cembung.
2. Lensa plankonveks (cembung datar), yaitu lensa yang salah satu permukaannya cembung dan permukaan lainnya datar.
3. Lensa konkaf-konveks (cembung cekung), yaitu lensa yang salah satu permukaannya cembung dan permukaan lainnya cekung.



Gambar 2.2 Klasifikasi Lensa Cembung

Lensa cembung bersifat konvergen atau mengumpulkan cahaya. Pada Gambar 2.3, terlihat bahwa cahaya-cahaya yang datang sejajar dengan sumbu utama akan dibiaskan menuju satu titik, yang disebut titik fokus.

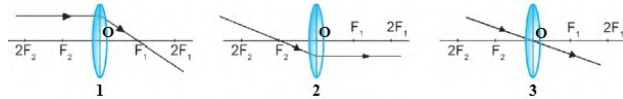


Gambar 2.3 Pembiasan Cahaya pada Lensa Cembung

Pembiasan cahaya melalui lensa cembung memiliki sifat-sifat khusus, seperti yang terlihat pada Gambar 2.4. Sifat-sifat tersebut adalah sebagai berikut.

1. Cahaya datang yang sejajar dengan sumbu utama akan dibiaskan menuju titik fokus (F_1).

2. Cahaya datang yang menuju titik fokus (F_2) akan dibiaskan sejajar dengan sumbu utama.
3. Cahaya datang yang menuju pusat optik (O) lensa akan diteruskan.

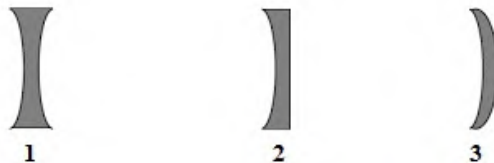


Gambar 2.4 Sifat-sifat Khusus Pembiasan Cahaya pada Lensa Cembung

2.2.2 Lensa Cekung

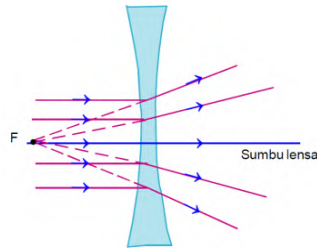
Lensa cekung adalah lensa yang bagian tengahnya lebih tipis daripada bagian tepinya. Gambar 2.5 menunjukkan bahwa lensa cekung juga dibagi menjadi tiga macam, yaitu:

1. Lensa bikonkaf (cekung ganda), yaitu lensa yang kedua permukaannya cekung.
2. Lensa plankonkaf (cekung datar), yaitu lensa yang salah satu permukaannya cekung dan permukaan lainnya datar.
3. Lensa konveks-konkaf (cekung cembung), yaitu lensa yang salah satu permukaannya cekung dan permukaan lainnya cembung.



Gambar 2.5 Klasifikasi Lensa Cekung

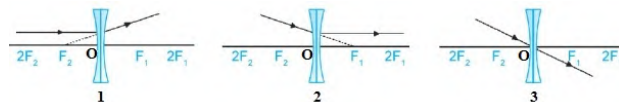
Lensa cekung bersifat divergen atau menyebarkan cahaya. Pada Gambar 2.6, terlihat bahwa cahaya-cahaya yang datang sejajar dengan sumbu utama akan disebarkan, seolah-olah berasal dari satu titik, yang disebut titik fokus.



Gambar 2.6 Pembiasan Cahaya pada Lensa Cekung

Pembiasan cahaya melalui lensa cekung juga memiliki sifat-sifat khusus, seperti yang terlihat pada Gambar 2.7. Sifat-sifat tersebut adalah sebagai berikut.

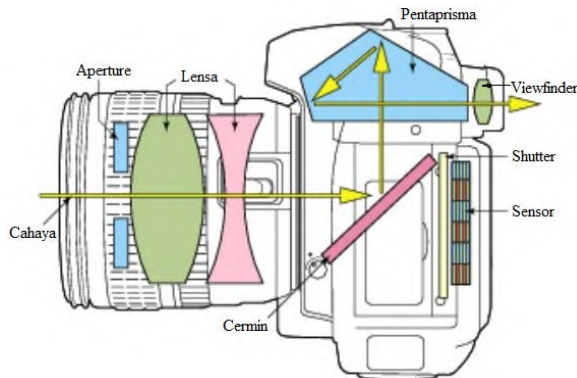
1. Cahaya datang yang sejajar dengan sumbu utama akan dibiaskan seolah-olah berasal dari titik fokus (F_2).
2. Cahaya datang yang seolah-olah menuju titik fokus (F_1) akan dibiaskan sejajar dengan sumbu utama.
3. Cahaya datang yang menuju pusat optik (O) lensa akan diteruskan.



Gambar 2.7 Sifat-sifat Khusus Pembiasan Cahaya pada Lensa Cekung

2.3 Kamera DSLR (Digital Single Lens Reflex)

Dalam Bahasa Indonesia, kamera DSLR dapat diartikan menjadi kamera digital dengan satu cermin pantul. Cahaya dari objek akan masuk melalui lensa hingga mengenai cermin pantul dan dilanjutkan menuju pentaprisma (cermin segi lima) untuk dipantulkan beberapa kali hingga menyentuh *viewfinder* atau pembedik, seperti pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Mekanisme Kamera DSLR

Ketika tombol *shutter* dilepaskan, cermin pantul akan mengayun ke atas sehingga cahaya mengenai *image sensor*. Cahaya yang tertangkap sensor kemudian diproses oleh prosesor pada kamera menjadi gambar digital dan disimpan pada *memory card*. Ukuran sensor pada kamera DSLR lebih besar daripada kamera jenis lainnya, sehingga kualitas gambar atau video yang dihasilkan lebih bagus dan tajam.

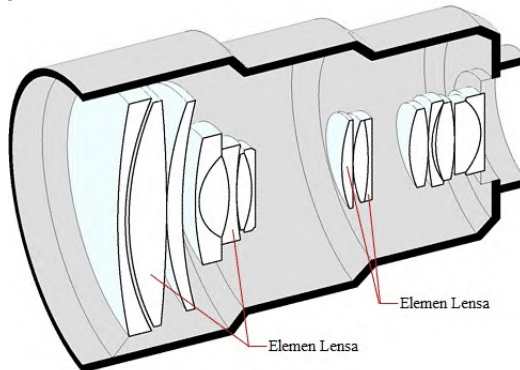
Sensor pada kamera DSLR berfungsi sama dengan lempengan film pada kamera konvensional. Lempengan film memiliki standar ukuran, yaitu 24 mm x 36 mm, yang disebut sebagai 35 mm *format*. Namun, ukuran *image sensor* pada kamera digital tidak terstandarisasi. Sehingga kamera DSLR yang mempunyai ukuran *image sensor* 24 mm x 36 mm disebut kamera DSLR Full-frame. Sedangkan kamera DSLR dengan *image sensor* yang lebih kecil disebut kamera DSLR Crop.

2.3.1 Lensa Kamera DSLR

Secara umum, lensa kamera DSLR dibagi menjadi dua, yaitu lensa *prime* atau *fix* dan lensa *zoom*. Lensa *prime* adalah lensa yang memiliki *focal length* tetap, misalnya 50 mm, 85 mm, dan 100 mm. Sedangkan lensa *zoom* adalah lensa yang memungkinkan perubahan nilai *focal length* sesuai kebutuhan, misalnya 18-55 mm, 17-85 mm, dan sebagainya. Lensa *zoom*

bahkan ada yang dirancang mampu mengakomodasi aplikasi *wide-angle* hingga *telephoto*, misalnya lensa 24-300 mm. Pada lensa *zoom*, terdapat istilah *optical zoom*, yaitu perbandingan antara *zoom-out* dan *zoom-in* maksimum. Maka pada lensa 24-300 mm, nilai *optical zoom* yang berlaku adalah 300:24 atau 12.5 kali.

Pada Gambar 2.9, terlihat bahwa di dalam suatu lensa kamera DSLR terdapat beberapa elemen lensa, baik lensa cembung maupun cekung, dan kaca optik. Lensa *zoom* memiliki jumlah elemen lebih banyak daripada lensa *prime*. Semakin besar nilai *optical zoom*, semakin banyak pula jumlah elemen yang ada di dalam suatu lensa kamera DSLR. Sehingga proses pembiasan cahaya yang terjadi juga semakin rumit. Oleh karena itu, dengan kualitas bahan elemen lensa yang sama, lensa *prime* mampu menghasilkan gambar yang lebih tajam. Selain itu, semakin besar nilai *optical zoom* juga akan berpengaruh pada penurunan ketajaman gambar.

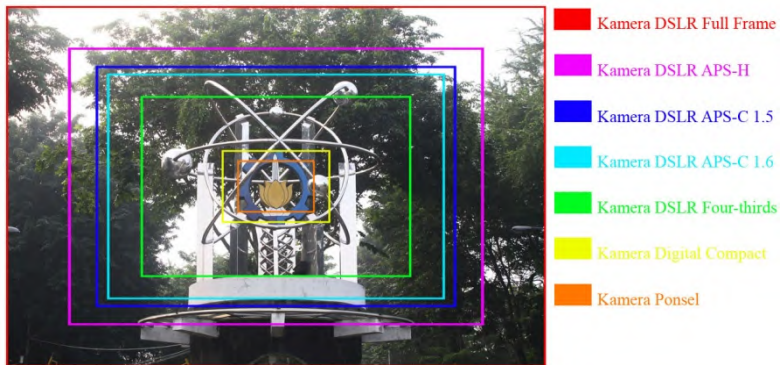


Gambar 2.9 Elemen-elemen Lensa Kamera DSLR

2.3.2 Crop Factor

Kamera DSLR sendiri terdiri dari dua jenis, yaitu *Full-frame* dan *Crop*. Pada kamera DSLR Full-frame, gambar yang dihasilkan akan sesuai dengan apa yang tertangkap oleh kamera. Sedangkan pada kamera DSLR Crop, gambar yang dihasilkan

akan mengalami pemotongan sebesar *crop factor* yang berlaku, seperti yang tampak pada Gambar 2.10. Kamera DSLR Crop memiliki tiga tipe, yaitu APS-H (*Advanced Photo System type H*), APS-C (*Advanced Photo System type C*) dan *Four-thirds system*. Tipe APS-H memiliki *crop factor* sebesar 1.3, APS-C dengan *crop factor* sebesar 1.5 dan 1.6 (tergantung merk kamera), sedangkan *crop factor* untuk tipe *Four-thirds* sebesar 2. Untuk *compact digital camera*, *crop factor* berkisar antara 5-6 (tergantung merk kamera). Sedangkan kamera pada ponsel biasanya memiliki *crop factor* lebih dari 7.



Gambar 2.10 *Crop Factor* pada Beberapa Jenis Kamera

Kamera DSLR yang digunakan pada penelitian ini adalah tipe APS-C dengan *crop factor* 1.6. *Crop factor* menyebabkan sudut pandang (*angle of view*) pengambilan gambar menjadi lebih sempit. Sehingga dengan *focal length* yang pendek, gambar yang dihasilkan seakan-akan diambil dengan *focal length* yang lebih panjang. Inilah yang disebut sebagai *equivalent focal length*, yang dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$f_e = f \times \text{crop factor}$$

2.3.3 Frame Rate

Video adalah gambar yang bergerak. *Frame rate* video menunjukkan jumlah gambar yang menyusun video tersebut tiap

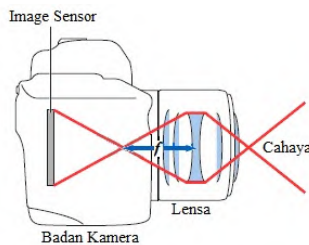
detiknya. Semakin tinggi *frame rate* suatu video, semakin banyak gambar yang dihasilkan ketika video tersebut di-*extract*. Selain itu, video dengan *frame rate* yang tinggi mampu merekam gerakan yang lebih cepat namun tetap menghasilkan gambar yang tajam dan jelas. Pada penelitian ini, fitur video yang digunakan memiliki *frame rate* 59.94 fps.

2.3.4 Kualitas Video

Kualitas suatu video diukur berdasarkan resolusinya. Resolusi suatu video terkait dengan ukuran video tersebut. Kualitas video yang ada antara lain TV (480 pixel), HD (720 pixel), dan Full HD (1080 pixel). Ukuran video untuk kualitas TV adalah 640x480 pixel (rasio 4:3). Ukuran video untuk kualitas HD adalah 1280x720 pixel (rasio 16:9). Dan ukuran video untuk kualitas Full HD adalah 1920x1080 pixel (rasio 16:9). Penelitian ini menggunakan video dengan kualitas HD.

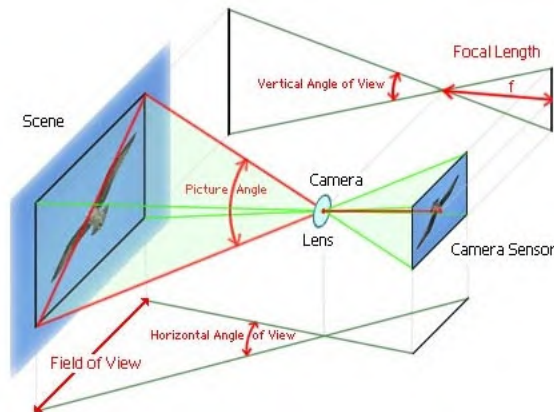
2.3.5 Focal Length dan Angle of View

Nilai *focal length* pada lensa *zoom* dapat diubah-ubah. Pengubahan nilai *focal length* akan menyebabkan pergeseran terhadap elemen-elemen di dalamnya. Sehingga, posisi pusat optik dan titik fokus akan berbeda-beda untuk tiap-tiap *focal length*. Sedangkan pada lensa *prime*, posisi pusat optik dan titik fokus akan selalu sama. Hal tersebut dikarenakan elemen-elemen pada lensa *prime* dirancang untuk tidak dapat bergeser (*fixed*). Namun, pada dasarnya, baik untuk lensa *zoom* maupun *prime*, *focal length* memiliki definisi yang sama.



Gambar 2.11 *Focal Length*

Gambar 2.11 menunjukkan bahwa *focal length* adalah jarak antara pusat optik lensa dan titik fokus dimana bayangan benda jatuh tepat pada sensor atau lempeng film untuk diproyeksikan menjadi gambar yang tajam. *Focal length* berkaitan erat dengan *angle of view*. Definisi *angle of view* (sudut pandang) adalah sudut yang dibentuk oleh dua titik terjauh pada bentangan suatu bidang, baik secara vertikal, horizontal, maupun diagonal, seperti yang tampak pada Gambar 2.12. *Focal length* yang pendek menyebabkan sudut pandang menjadi lebar dan menghasilkan bidang pandang (*field of view*) yang luas. Sebaliknya, *focal length* yang panjang menyebabkan sudut pandang menjadi sempit dan objek tampak lebih besar.

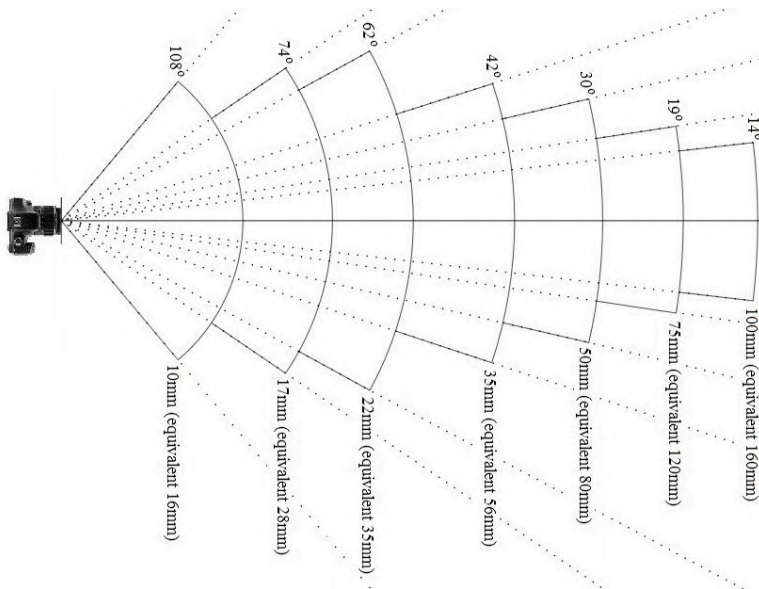


Gambar 2.12 Ilustrasi *Focal Length* dan *Angle of View*

Lensa dengan *focal length* 50 mm mewakili bidang pandang mata manusia dan disebut sebagai lensa normal. Oleh karena itu, lensa dengan *focal length* kurang dari 50 mm dikategorikan sebagai lensa lebar (*wide-angle*) dan lensa dengan *focal length* lebih dari 50 mm dikategorikan sebagai lensa *telephoto*.

Dalam dunia fotografi terdapat istilah “35 mm equivalent *focal length*”. Hal tersebut dikarenakan semakin populernya kamera digital dengan sensor yang lebih kecil dari 35 mm *format*.

Di sisi lain, standar 35 mm *format* sudah dikenal sejak tahun 1920-an. Sehingga banyak fotografer yang terbiasa dengan standar tersebut. Namun di era digital, kamera dengan ukuran sensor 35 mm *format* relatif mahal. Sehingga diciptakan kamera-kamera dengan *crop factor* yang bervariasi. Dengan adanya *crop factor*, muncul istilah *equivalent focal length*. *Equivalent focal length* adalah penyetaraan sudut dan bidang pandang pengambilan gambar oleh kamera crop terhadap kamera 35 mm *format*. Misalnya, suatu kamera dengan *crop factor* 1.6 digunakan untuk mengambil gambar dengan *focal length* 10 mm akan memiliki sudut dan bidang pandang yang setara dengan 16 mm pada kamera 35 mm *format*, seperti pada Gambar 2.13. Dan “35 mm *equivalent focal length*” adalah istilah untuk penyetaraan tersebut.

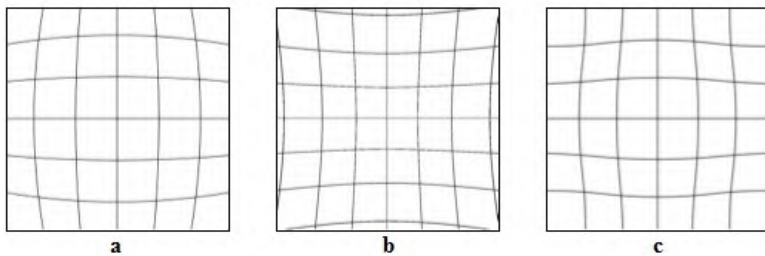


Gambar 2.13 *Focal Length* dan *Angle of View* pada Kamera DSLR APS-C 1.6

Pada penelitian ini dipilih *focal length* 10 mm, yang setara dengan 16 mm pada kamera 35 mm *format*, karena merupakan *ultra wide-angle*. Dan *focal length* 22 mm, yang setara dengan 35 mm, karena merupakan *wide-angle*. Secara teoritis, semakin lebar (wide) sudut menyebabkan semakin besar distorsi yang terjadi. Penelitian ini menggunakan dua *focal length* pada kategori yang berbeda agar dapat diketahui korelasi antara *focal length* dan distorsi lensa.

2.3.6 Distorsi

Distorsi adalah suatu fenomena ketidakakuratan lensa dalam menangkap suatu citra akibat melengkungnya optik sehingga gambar yang dihasilkan juga mengalami lengkungan di bagian tepi.



Gambar 2.14 Penampakan Distorsi (a) *Barrel*, (b) *Pincushion*, dan (c) *Mustache*

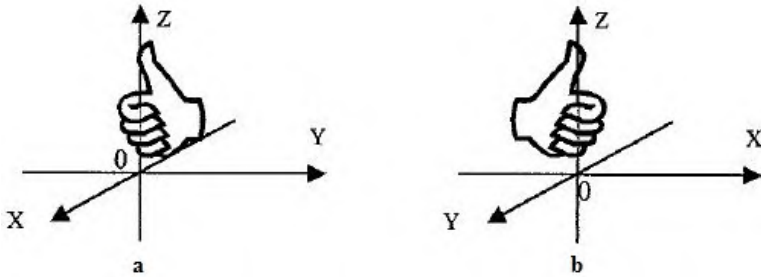
Gambar 2.14 memperlihatkan bahwa efek distorsi menyebabkan suatu garis yang lurus menjadi tampak melengkung dan dapat terjadi pada lensa *wide-angle* dan *telephoto*. Distorsi pada lensa *wide-angle* disebut distorsi *barrel*, karena bentuknya menyerupai tong yang membesar di bagian tengahnya. Sedangkan distorsi pada lensa *telephoto* disebut distorsi *pincushion*, kebalikan dari distorsi *barrel*, mengecil pada bagian tengah. Selain dua jenis tersebut, terdapat juga distorsi *mustache*. Distorsi yang dinamakan karena bentuknya menyerupai kumis ini tidak terlalu populer walaupun pada praktiknya cukup sering terjadi. Distorsi *mustache* merupakan kombinasi dari distorsi *barrel* dan

pincushion sehingga sering disebut sebagai distorsi kompleks. Distorsi ini biasanya terjadi pada lensa dengan nilai *optical zoom* yang besar, misalnya lensa 24-300 mm (*optical zoom* 12.5 kali). Pada aplikasi *zoom-out* maksimum, distorsi *mustache* tersusun atas distorsi *barrel* pada bagian tengah dan distorsi *pincushion* pada bagian tepi. Sedangkan pada *zoom-in* maksimum, komposisi berubah menjadi distorsi *pincushion* di bagian tengah dan distorsi *barrel* pada bagian tepi. Penelitian ini hanya melibatkan distorsi *barrel* karena pengambilan video dilakukan menggunakan lensa *wide-angle* dengan nilai *optical zoom* sebesar 2.2 kali.

Dalam dunia fotografi, distorsi dapat dimanfaatkan menjadi sebuah seni, terutama untuk objek-objek arsitektur bangunan, interior ruangan, pemandangan, dan segala hal yang tidak membutuhkan perspektif asli. Namun, efek distorsi sangat merugikan apabila digunakan untuk objek-objek yang membutuhkan perspektif asli, termasuk pengukuran kecepatan yang dilakukan pada penelitian ini.

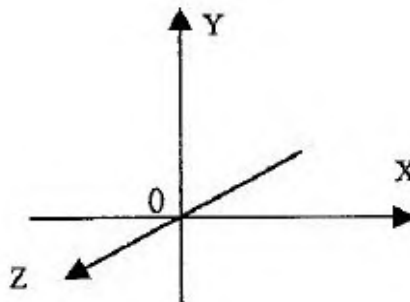
2.4 Sistem Koordinat Cartesius

Sistem Koordinat Cartesius terdiri dari tiga sumbu koordinat, yaitu sumbu X, sumbu Y, dan sumbu Z. Suatu objek akan menempati bidang XYZ yang tersusun dari titik-titik koordinat (x, y, z). Sistem Koordinat Cartesius dalam ruang tiga dimensi dibagi dalam dua kategori, yaitu sistem tangan kanan dan sistem tangan kiri. Pada sistem tangan kanan, sumbu Y dan sumbu Z terletak pada bidang kertas dengan arah positif masing-masing ke kanan dan ke atas, kemudian sumbu X tegak lurus bidang dengan arah positif keluar. Sedangkan pada sistem tangan kiri, sumbu X dan sumbu Z terletak pada bidang kertas dengan arah positif masing-masing ke kanan dan ke atas, kemudian sumbu Y tegak lurus bidang dengan arah positif keluar. Pemetaan kedua sistem koordinat tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.15.



Gambar 2.15 (a) Sistem Koordinat Tangan Kanan dan (b) Sistem Koordinat Tangan Kiri

Sistem Koordinat Cartesius yang digunakan pada penelitian ini adalah sistem tangan kanan yang telah dimodifikasi dengan memutar 90° ke bawah menggunakan sumbu Y sebagai sumbu putar dan dilanjutkan dengan memutar 90° ke kiri menggunakan sumbu Z sebagai sumbu putar. Sehingga Sistem Koordinat Cartesius yang digunakan memiliki sumbu X sebagai sumbu horizontal, sumbu Y sebagai sumbu vertikal, dan sumbu Z sebagai sumbu kedalaman, seperti pada Gambar 2.16 berikut.



Gambar 2.16 Sistem Tangan Kanan yang Dimodifikasi

2.5 Vektor

Secara geometris, vektor dapat dinyatakan sebagai garis berarah. Panjang garis menyatakan besaran vektor dan arah panah menunjukkan arah vektor. Ekor panah disebut titik awal (*initial point*) dan ujung panah merupakan titik terminal (*terminal point*).

Arah dari suatu vektor sangat berarti. Dua vektor dengan arah yang sama mengalami operasi penjumlahan. Sedangkan dua vektor dengan arah berlawanan akan mengalami operasi pengurangan.

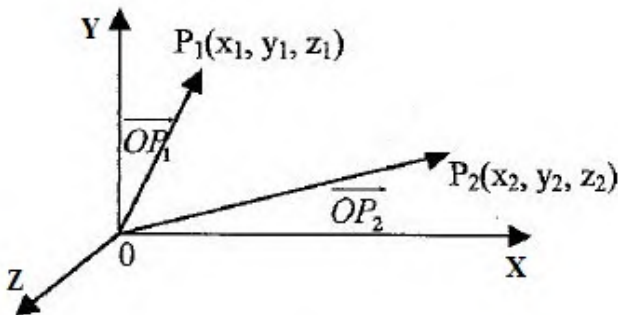
Pada penelitian ini dilakukan analisis posisi, perpindahan, dan kecepatan titik yang melekat pada suatu kereta api mainan yang bergerak lurus pada bidang horizontal. Analisis-analisis tersebut dipetakan pada Sistem Koordinat Cartesius.

2.5.1 Posisi

Posisi adalah lokasi suatu titik massa terhadap acuan tertentu. Posisi suatu titik pada koordinat Cartesius tiga dimensi dinyatakan oleh (x, y, z) . Elemen x , y , dan z dapat memiliki harga positif atau negatif. Suatu vektor posisi dalam bidang ruang, OP , dapat dinyatakan dalam vektor-vektor satuan \mathbf{i} , \mathbf{j} , dan \mathbf{k} sebagai berikut.

$$\overrightarrow{OP} = x\mathbf{i} + y\mathbf{j} + z\mathbf{k}$$

Persamaan gerak tiga dimensi digambarkan menggunakan fungsi dalam vektor. Vektor posisi digambarkan sebagai bagian dari koordinat Cartesius.



Gambar 2.17 Vektor Posisi pada Koordinat Cartesius

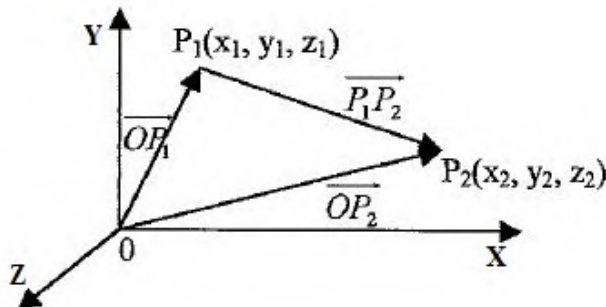
Pada Gambar 2.17 terdapat titik $P_1 (x_1, y_1, z_1)$ dan $P_2 (x_2, y_2, z_2)$ pada bidang XYZ, maka vektor posisi yang dihasilkan adalah:

$$\overrightarrow{OP_1} = [x_1, y_1, z_1]$$

$$\overrightarrow{OP_2} = [x_2, y_2, z_2]$$

2.5.2 Perpindahan

Vektor perpindahan juga digambarkan sebagai bagian dari koordinat Cartesius.



Gambar 2.18 Vektor Perpindahan Suatu Titik

Gambar 2.18 menunjukkan perpindahan suatu titik pada koordinat Cartesius. Perpindahan adalah perubahan posisi suatu titik massa terhadap suatu acuan tertentu. Misalnya sebuah titik bergerak pada bidang XYZ. Pada saat P_1 , vektor posisinya adalah $\overrightarrow{OP_1}$, dan pada saat P_2 , vektor posisinya adalah $\overrightarrow{OP_2}$, maka vektor perpindahan titik tersebut, $\overrightarrow{P_1P_2}$, adalah sebagai berikut.

$$\overrightarrow{P_1P_2} = | \overrightarrow{OP_2} - \overrightarrow{OP_1} |$$

2.5.3 Kecepatan

Kecepatan rata-rata adalah hasil pembagian dari perpindahan dan interval waktu yang dibutuhkan untuk menempuh jarak tersebut. Misalnya pada Gambar 2.18, titik P_1 adalah saat $t=t_0$ dan P_2 saat $t'=t_0+\Delta t$. Waktu yang dibutuhkan

untuk berpindah dari P_1 ke P_2 adalah Δt . Sehingga kecepatan rata-rata titik tersebut dapat didefinisikan sebagai berikut.

$$\tilde{V} = \frac{\overrightarrow{P_1 P_2}}{\Delta t}$$

Selain itu, terdapat pula kecepatan sesaat, yaitu kecepatan suatu titik pada satu waktu tertentu, yang memberikan informasi lebih akurat. Kecepatan sesaat ini diperoleh bila Δt sangat singkat, atau secara matematis dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$\tilde{V}_t = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\overrightarrow{P_1 P_2}}{\Delta t} = \frac{d(\overrightarrow{P_1 P_2})}{dt}$$

Sedangkan kecepatan sebagai vektor dalam koordinat Cartesius dapat ditulis sebagai berikut.

$$|\tilde{V}| = \sqrt{\tilde{V}_x^2 + \tilde{V}_y^2 + \tilde{V}_z^2}$$

2.5.4 Percepatan dan Perlambatan

Kecepatan suatu objek tidak akan selalu sama dari waktu ke waktu. Hal tersebut terjadi karena adanya faktor-faktor penghambat seperti gaya gesek atau tumbukan. Perubahan kecepatan itulah yang akan menyebabkan terjadinya percepatan atau perlambatan. Percepatan terjadi jika kecepatan suatu objek meningkat seiring berjalannya waktu atau ΔV bernilai positif. Sebaliknya, perlambatan terjadi jika kecepatan semakin menurun seiring berjalannya waktu atau ΔV bernilai negatif. Baik percepatan maupun perlambatan dapat didefinisikan sebagai berikut.

$$\tilde{a} = \frac{\Delta \tilde{V}}{\Delta t} = \frac{\tilde{V}_2 - \tilde{V}_1}{t_2 - t_1}$$

Sama halnya dengan kecepatan, terdapat pula percepatan dan perlambatan sesaat. Percepatan dan perlambatan sesaat

adalah perubahan kecepatan dalam interval waktu yang sangat singkat dan dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$\tilde{a}_t = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \tilde{V}}{\Delta t} = \frac{d\tilde{V}}{dt}$$

Sedangkan vektor percepatan dan perlambatan dalam koordinat Cartesius dapat ditulis sebagai berikut.

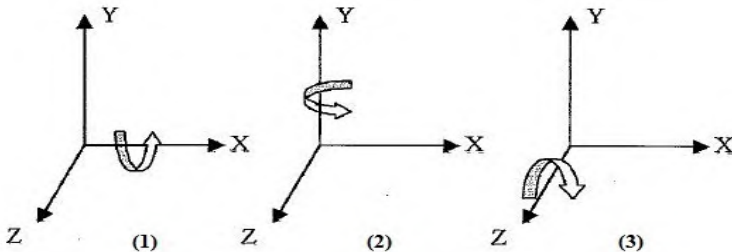
$$|\tilde{a}| = \sqrt{\tilde{a}_x^2 + \tilde{a}_y^2 + \tilde{a}_z^2}$$

2.6 Transformasi Rotasi Tiga Dimensi

Transformasi rotasi adalah perubahan suatu titik koordinat menuju kedudukan baru dengan menggerakkan titik tersebut sesuai nilai besaran sudut pada suatu sumbu putar. Suatu titik koordinat tiga dimensi yang ditentukan oleh tiga posisi, yaitu posisi terhadap sumbu X, sumbu Y, dan sumbu Z, dapat dirotasikan dalam bentuk operasi matriks.

Matriks merupakan kumpulan angka atau notasi yang tersusun dalam bentuk baris dan kolom. Angka atau notasi yang menyusun matriks disebut elemen matriks.

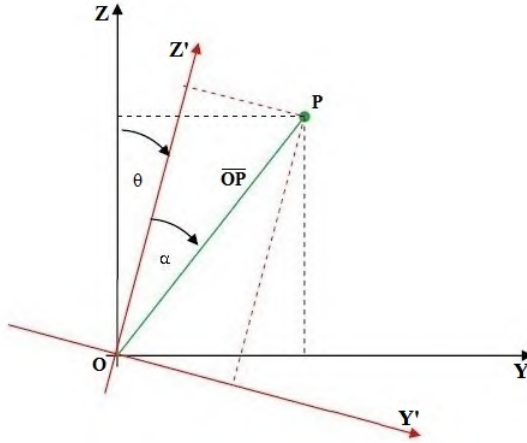
Pada penelitian ini, transformasi rotasi dapat digunakan untuk mencari nilai distorsi lensa pada titik-titik yang diinginkan. Rotasi suatu titik pada sistem koordinat tiga dimensi dapat dilakukan terhadap sumbu X, sumbu Y, maupun sumbu Z, seperti yang tampak pada Gambar 2.19.



Gambar 2.19 Rotasi terhadap (1) sumbu X, (2) sumbu Y, dan (3) sumbu Z

2.6.1 Rotasi Terhadap Sumbu X

Gambar 2.20 menunjukkan rotasi searah jarum jam dari sudut pandang sumbu X tegak lurus bidang dengan arah keluar.



Gambar 2.20 Rotasi Searah Jarum Jam terhadap Sumbu X

$$y_p = \overline{OP} \sin(\alpha + \theta) = \overline{OP} \sin \alpha \cdot \cos \theta + \overline{OP} \cos \alpha \cdot \sin \theta$$

$$y'_p = \overline{OP} \sin \alpha$$

$$z_p = \overline{OP} \cos(\alpha + \theta) = \overline{OP} \cos \alpha \cdot \cos \theta - \overline{OP} \sin \alpha \cdot \sin \theta$$

$$z'_p = \overline{OP} \cos \alpha$$

$$y_p = y'_p \cdot \cos \theta + z'_p \cdot \sin \theta$$

$$z_p = z'_p \cdot \cos \theta - y'_p \cdot \sin \theta$$

$$\begin{bmatrix} y_p \\ z_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y'_p \\ z'_p \end{bmatrix}$$

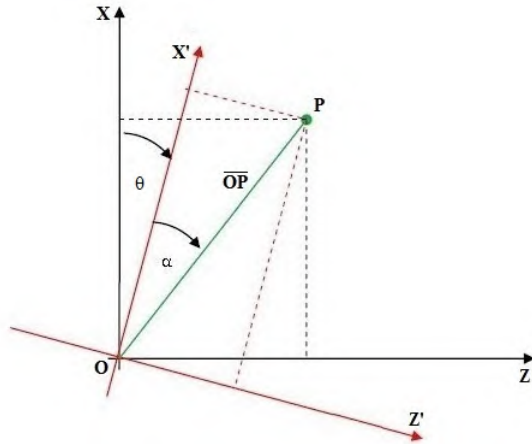
$$\begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_p \\ z_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y'_p \\ z'_p \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} y'_p \\ z'_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_p \\ z_p \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} x'_p \\ y'_p \\ z'_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{bmatrix}$$

2.6.2 Rotasi Terhadap Sumbu Y

Gambar 2.21 menunjukkan rotasi searah jarum jam dari sudut pandang sumbu Y tegak lurus bidang dengan arah keluar.



Gambar 2.21 Rotasi Searah Jarum Jam terhadap Sumbu Y

$$x_p = \overline{OP} \cos(\alpha + \theta) = \overline{OP} \cos \alpha \cdot \cos \theta - \overline{OP} \sin \alpha \cdot \sin \theta$$

$$x'_p = \overline{OP} \cos \alpha$$

$$z_p = \overline{OP} \sin(\alpha + \theta) = \overline{OP} \sin \alpha \cdot \cos \theta + \overline{OP} \cos \alpha \cdot \sin \theta$$

$$z'_p = \overline{OP} \sin \alpha$$

$$x_p = x'_p \cdot \cos \theta - z'_p \cdot \sin \theta$$

$$z_p = z'_p \cdot \cos \theta + x'_p \cdot \sin \theta$$

$$\begin{bmatrix} x_p \\ z_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'_p \\ z'_p \end{bmatrix}$$

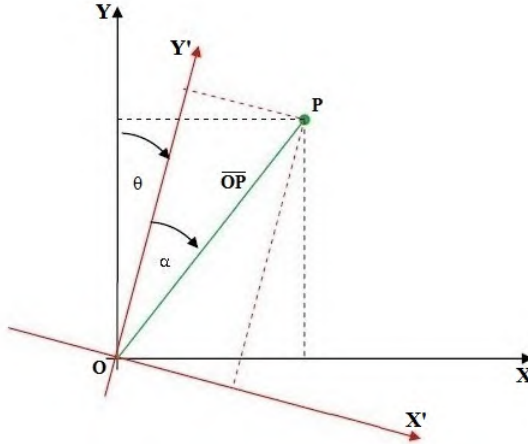
$$\begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_p \\ z_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'_p \\ z'_p \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} x'_p \\ z'_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_p \\ z_p \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} x'_p \\ y'_p \\ z'_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{bmatrix}$$

2.6.3 Rotasi Terhadap Sumbu Z

Gambar 2.22 menunjukkan rotasi searah jarum jam dari sudut pandang sumbu Z tegak lurus bidang dengan arah keluar.



Gambar 2.22 Rotasi Searah Jarum Jam terhadap Sumbu Z

$$x_p = \overline{OP} \sin(\alpha + \theta) = \overline{OP} \sin \alpha \cdot \cos \theta + \overline{OP} \cos \alpha \cdot \sin \theta$$

$$x'_p = \overline{OP} \sin \alpha$$

$$y_p = \overline{OP} \cos(\alpha + \theta) = \overline{OP} \cos \alpha \cdot \cos \theta - \overline{OP} \sin \alpha \cdot \sin \theta$$

$$y'_p = \overline{OP} \cos \alpha$$

$$x_p = x'_p \cdot \cos \theta + y'_p \cdot \sin \theta$$

$$y_p = y'_p \cdot \cos \theta - x'_p \cdot \sin \theta$$

$$\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'_p \\ y'_p \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'_p \\ y'_p \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} x'_p \\ y'_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} x'_p \\ y'_p \\ z'_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{bmatrix}$$

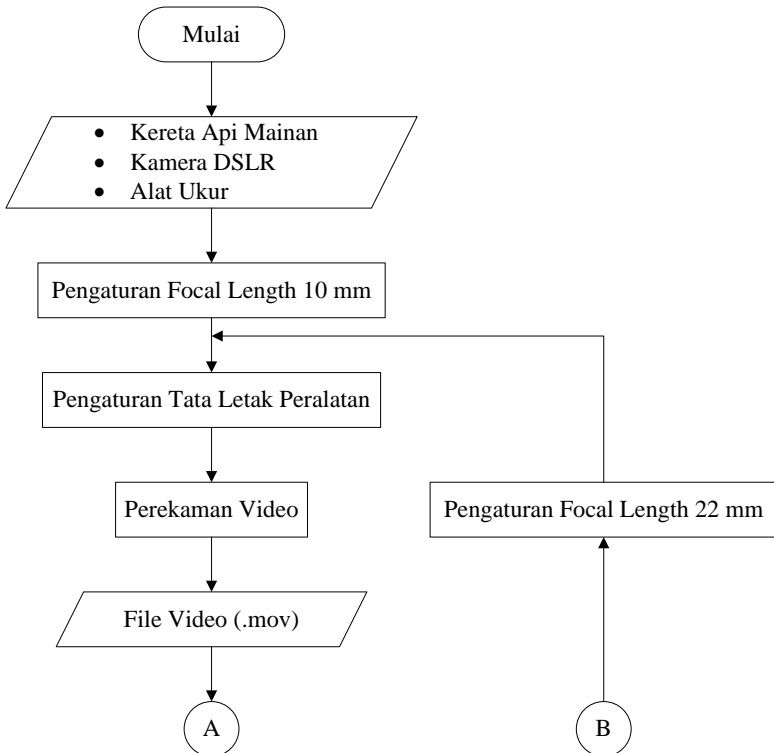
BAB III METODOLOGI

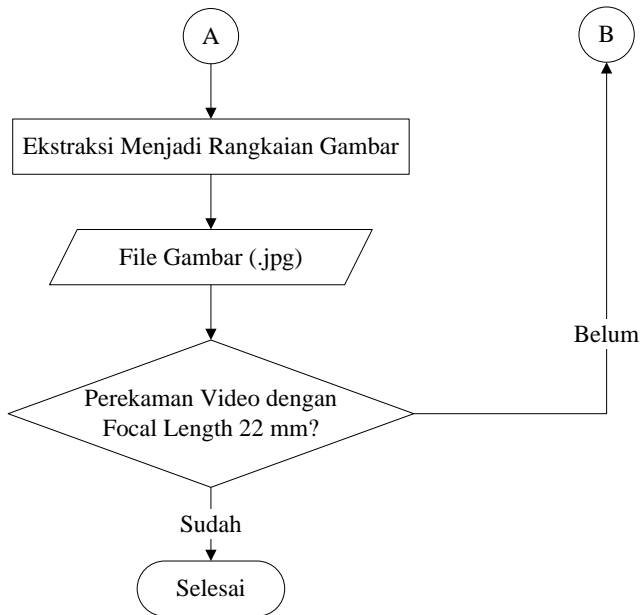
3.1 Diagram Alir

Metodologi yang digunakan dalam penelitian ini terbagi menjadi dua bagian, yaitu pengambilan data dan perhitungan. Metodologi tersebut akan dijelaskan dalam diagram alir sebagai berikut.

3.1.1 Diagram Alir Pengambilan Data

Langkah-langkah pengambilan data dapat dijelaskan dalam diagram alir berikut.





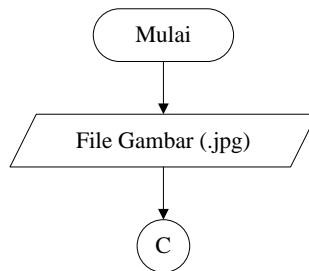
Gambar 3.1 Diagram Alir Pengambilan Data

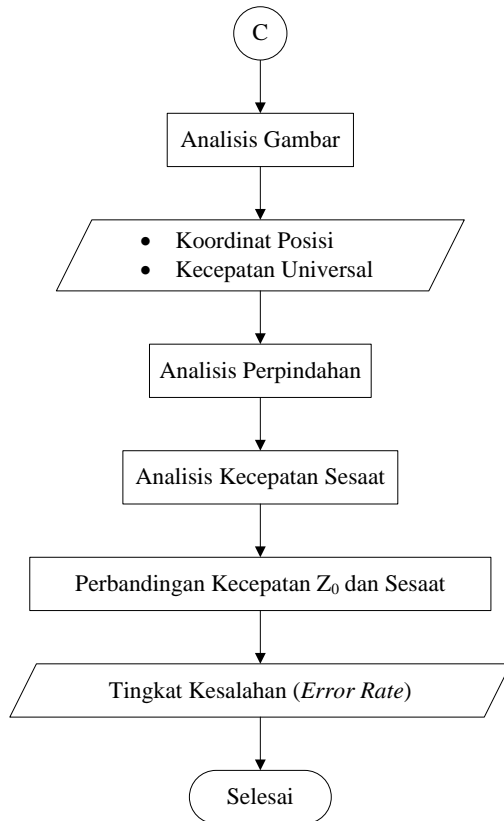
3.1.2 Diagram Alir Perhitungan

Setelah data didapat, maka penelitian dilanjutkan dengan perhitungan. Perhitungan dibagi menjadi tiga, yaitu perhitungan tingkat kesalahan (*error rate*), percepatan sesaat, dan distorsi.

1. Perhitungan Tingkat Kesalahan (*Error Rate*)

Langkah-langkah dalam menghitung tingkat kesalahan dijelaskan melalui diagram alir berikut.

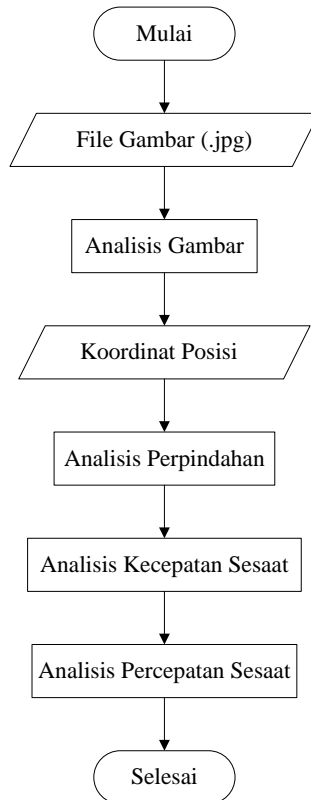




Gambar 3.2 Diagram Alir Perhitungan Tingkat Kesalahan (*Error Rate*)

2. Perhitungan Percepatan Sesaat

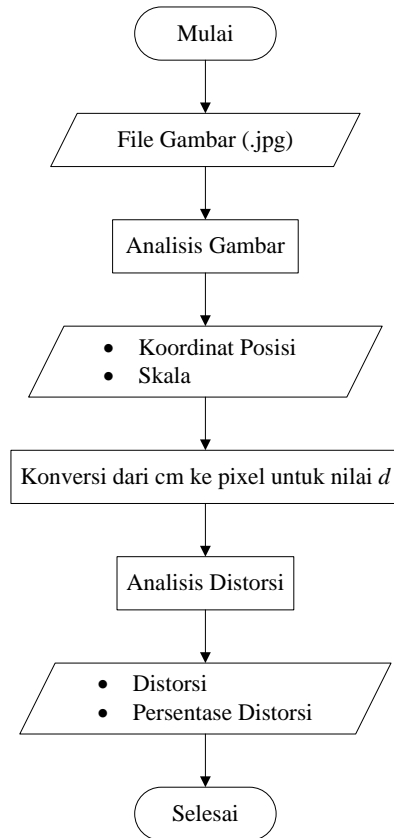
Langkah-langkah untuk menghitung percepatan sesaat dijelaskan melalui diagram alir berikut.



Gambar 3.3 Diagram Alir Perhitungan Percepatan Sesaat

3. Perhitungan Distorsi

Langkah-langkah perhitungan nilai distorsi dijelaskan melalui diagram alir berikut.



Gambar 3.4 Diagram Alir Perhitungan Distorsi

3.2 Peralatan dan Bahan

Alat adalah benda fisik maupun non-fisik yang digunakan untuk melakukan penelitian. Sedangkan bahan adalah hasil kinerja peralatan yang diolah untuk memperoleh data dalam perhitungan.

3.2.1 Peralatan

1. Kamera : Canon EOS 550D
2. Lensa : Canon Zoom Lens EF-S 10-22mm
3. Objek : Kereta Api Mainan
4. Alat Ukur : Mistar
5. *Software* : Blender
Digital Photo Professional
Microsoft Office Excel 2007
6. Variabel : *Focal Length* 10 mm
Focal Length 22 mm

3.2.2 Bahan

1. File Video : MOV movie (1280x720, 59.94 fps)
2. File Gambar : JPEG image (1280x720, 96 dpi)

3.3 Prosedur Penelitian

Langkah-langkah yang benar dan sistematis diperlukan untuk mencapai tujuan penelitian. Mengingat penelitian ini diharapkan bisa bermanfaat sebagai koreksi terhadap penelitian-penelitian terdahulu, serta sebagai referensi untuk penelitian-penelitian berikutnya dan informasi bagi dunia fotografi, kondisi dan metode perekaman video sangat diperhatikan. Selain itu, pengambilan data juga dilakukan secara teliti. Prosedur penelitian dilakukan sesuai dengan diagram alir. Penjelasan lebih rinci dari diagram alir tersebut adalah sebagai berikut.

1. Mengatur *Focal Length*

Setelah peralatan dalam kondisi siap pakai, hal pertama yang perlu dilakukan ialah mengatur *focal length*. *Focal length* dapat diatur dengan memutar

grip pada lensa. Putaran searah jarum jam (*clockwise*) untuk memperpendek *focal length* dan putaran berlawanan arah jarum jam (*counterclockwise*) untuk sebaliknya, seperti yang terlihat pada Gambar 3.5.

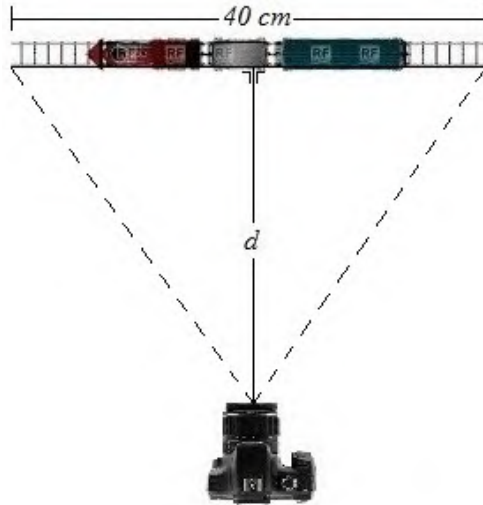


Gambar 3.5 Pengaturan *Focal Length*

2. Mengatur Tata Letak Peralatan

Pengambilan dekat mengondisikan hasil video memiliki bidang pandang (*field of view*) horizontal 40 cm, seperti yang tampak pada Gambar 3.6. Oleh karena itu, tiap *focal length* memiliki jarak (d) antar kamera dan objek yang berbeda-beda. Semakin panjang *focal length*, jarak tersebut juga semakin jauh. Untuk *focal length* 10 mm, jarak (d) antara kamera dan objek adalah 9 cm. Sedangkan untuk *focal length* 22 mm memiliki jarak (d) sejauh 29.4 cm. Selain itu juga dilakukan pengambilan jauh. Pada pengambilan jauh, jarak (d) merupakan variabel bebas. Sehingga hasil video tidak lagi dikondisikan memiliki bidang pandang tertentu. Namun proses perekaman dilakukan dari dua kali jarak (d) pengambilan dekat, yaitu 18 cm untuk *focal*

length 10 mm dan 58.8 cm untuk *focal length* 22 mm.



Gambar 3.6 Jarak antara Kamera dan Objek

3. Merekam Video

Pencarian fokus dilakukan terlebih dahulu sebelum memulai perekaman. Hal tersebut bertujuan agar hasil video tidak buram. Perekaman video dilakukan selama kereta api mainan bergerak melewati *frame* dengan tiga repetisi untuk gerakan konstan jarak dekat dan dua kali untuk gerakan konstan jarak jauh, serta sekali untuk gerakan dengan perlambatan. Perekaman dilakukan dengan *focal length* 10 mm terlebih dahulu, kemudian dilanjutkan dengan *focal length* 22 mm. Perekaman dilakukan di luar ruangan pada pagi hari agar mendapat cahaya yang cukup sehingga kamera dapat menjalankan fungsinya secara optimal.

4. Mengekstraksi Video

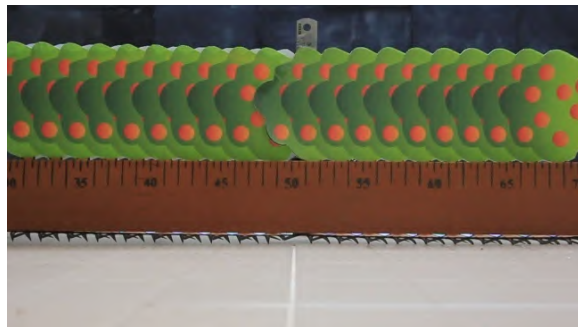
Setelah file video diperoleh, langkah selanjutnya adalah mengekstraksi, yaitu memecah video menjadi rangkaian gambar, dengan mengoperasikan *software* Blender. Rangkaian gambar adalah gambar-gambar yang saling berurutan. Jumlah gambar yang dihasilkan bergantung dari *frame rate* dan durasi video.

5. Menganalisis Gambar

Proses analisis gambar dikerjakan dengan bantuan perangkat lunak Digital Photo Professional. Ada tiga nilai yang dicari melalui analisis gambar, yaitu skala, kecepatan universal (\tilde{V}_u), dan koordinat posisi.

a. Skala (pixel/cm)

Meletakkan mistar tepat di tengah dan sejajar dengan kamera ditujukan untuk mencari nilai skala. Dengan meletakkannya di tengah seperti pada Gambar 3.7, proyeksi mistar tidak mengalami distorsi secara vertikal. Selain itu, untuk menghindari distorsi secara horizontal, satuan panjang yang digunakan sebagai skala adalah 1 cm pada bagian tengah mistar sehingga konversi dari pixel ke cm ataupun sebaliknya dapat lebih akurat.



Gambar 3.7 Posisi Mistar

b. Kecepatan Universal, \tilde{V}_u (pixel/detik)

Kereta api mainan yang bergerak menggunakan daya baterai memiliki kecepatan yang konstan. Kecepatan universal ini adalah kecepatan rerata kereta api tersebut. Objek yang berkecepatan konstan seharusnya memiliki nilai kecepatan universal yang relatif sama dari waktu ke waktu. Adapun cara untuk mencari kecepatan universal adalah sebagai berikut.



Gambar 3.8 Rangkaian Gambar

1. Tentukan acuan yang digunakan, misalnya cerobong kereta api.
2. Tentukan *frame* awal, yaitu ketika acuan mulai terlihat, dan *frame* terakhir, sesaat sebelum acuan tak lagi terlihat.
3. Hitung jumlah *frame* keseluruhan (N).
4. Hitung jarak kedua batas bidang horizontal (w), dalam satuan pixel.
5. Hitung nilai kecepatan universal (\tilde{V}_u) dengan menggunakan rumus berikut.

$$\tilde{V}_u = \frac{w \cdot \text{frame rate}}{N}$$

c. Koordinat Posisi

Titik acuan, seperti yang tampak pada Gambar 3.9, adalah objek pada penelitian yang terletak pada badan kereta api mainan dan dikondisikan sejajar dengan lensa kamera. Rangkaian gambar hasil ekstraksi video akan memberikan identitas yang berbeda-beda dan menyebabkan titik acuan tampak seakan-akan bergerak seiring berjalannya

waktu. Identitas titik acuan tersebut dicatat koordinatnya (x , y) dari tiap gambar sebagai data koordinat posisi.



Gambar 3.9 Ilustrasi Titik Acuan

6. Menganalisis Perpindahan

Setelah koordinat posisi dari tiap gambar diketahui, analisis perpindahan dapat dilakukan. *Frame* pertama menghasilkan koordinat (x_1 , y_1). *Frame* kedua menghasilkan koordinat (x_2 , y_2), dan demikian selanjutnya hingga *frame* terakhir. Contoh data koordinat posisi seperti pada Tabel 3.1 berikut.

Tabel 3.1 Koordinat X dan Y, nilai ΔX , dan nilai ΔY dalam Satuan Pixel

Frame	Koordinat		ΔX	ΔY
	X	Y		
1	x_1	y_1	$x_2 - x_1$	$y_2 - y_1$
2	x_2	y_2	$x_3 - x_2$	$y_3 - y_2$
3	x_3	y_3	$x_4 - x_3$	$y_4 - y_3$
4	x_4	y_4	$x_5 - x_4$	$y_5 - y_4$
5	x_5	y_5	-	-

Dengan demikian, nilai perpindahan secara horizontal (Δx) dan vertikal (Δy) dapat dicari dengan rumus berikut.

$$\overrightarrow{\Delta x_n} = x_{n+1} - x_n$$

$$\overrightarrow{\Delta y_n} = y_{n+1} - y_n$$

7. Menganalisis Kecepatan Sesaat, \tilde{V}_n (pixel/detik)

Kecepatan sesaat adalah kecepatan objek dalam waktu yang sangat singkat. Dalam penelitian ini, kecepatan sesaat adalah kecepatan objek antar *frame* dalam interval tertentu, yang dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$\tilde{V}_n = \frac{\sqrt{\Delta x_n^2 + \Delta y_n^2} \cdot \text{frame rate}}{\text{Interval}}$$

8. Membandingkan Kecepatan Z_0 dan Sesaat (\tilde{V}_n)

Hal ini dilakukan untuk mengetahui seberapa besar pengaruh distorsi lensa terhadap keakuratan pengukuran kecepatan. Kereta api yang bergerak dengan kecepatan konstan seharusnya memiliki kecepatan sesaat yang sama, baik pada bagian tengah ataupun tepi *frame*. Hal tersebut dikarenakan tidak adanya percepatan yang terjadi. Namun, suatu distorsi bisa menyebabkan terjadinya selisih kecepatan sesaat antara bagian tengah dan tepi *frame*, yang dapat dianggap sebagai *error*. Tingkat kesalahan (*error rate*) tersebut dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$E = \frac{|\tilde{V}_n - \tilde{V}_{Z_0}|}{\tilde{V}_{Z_0}} \cdot 100\%$$

9. Menganalisis Percepatan Sesaat, \tilde{a}_n (pixel/detik²)

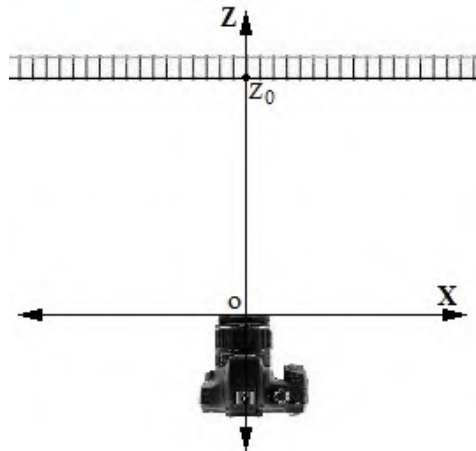
Percepatan sesaat adalah perubahan kecepatan objek dalam waktu yang sangat singkat. Dalam penelitian ini, percepatan sesaat adalah perubahan kecepatan

objek antar *frame* dalam interval tertentu, yang dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$\tilde{a}_n = \frac{(\tilde{V}_{n+1} - \tilde{V}_n) \cdot \text{frame rate}}{\text{Interval}}$$

10. Mengonversi Nilai d dari cm ke pixel

Untuk mengukur nilai distorsi yang terjadi, langkah awal yang harus dilakukan adalah analisis gambar. Namun, jika untuk menghitung tingkat kesalahan (*error rate*) membutuhkan nilai kecepatan universal dan koordinat posisi, menghitung distorsi membutuhkan nilai skala dan koordinat posisi. Skala akan digunakan untuk mengonversi nilai jarak (d) antara kamera dan objek dari cm ke pixel. Hasil konversi dalam satuan pixel akan digunakan untuk nilai z_0 . Posisi z_0 dapat dilihat pada Gambar 3.10.



Gambar 3.10 Titik z_0

11. Menganalisis Distorsi

Langkah-langkah dalam melakukan analisis distorsi adalah sebagai berikut.

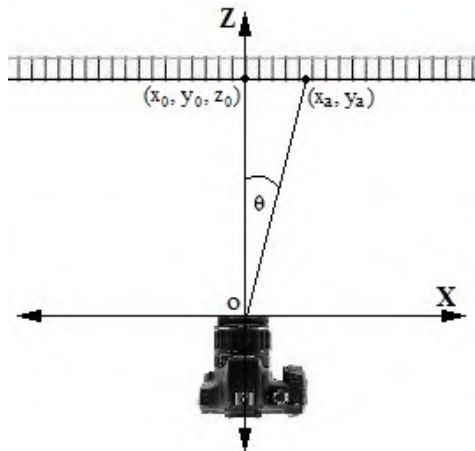
1. Menentukan Posisi 0 (No1)

Koordinat yang dimaksud adalah ketika titik acuan tepat berada di tengah *frame*. Hal tersebut dikarenakan posisi tengah tidak mengalami distorsi. Sehingga posisi tengah memiliki koordinat (x_0, y_0, z_0) .

2. Menentukan Posisi Terdistorsi

Misalkan ingin diketahui distorsi pada titik a, maka dicari koordinat (x_a, y_a) dari *frame* ketika titik acuan pada posisi a.

3. Mencari Sudut θ



Gambar 3.11 Sudut θ

Objek yang bergerak lurus pada sumbu X menyebabkan perubahan terhadap sumbu Y sangat kecil. Sehingga pada penelitian ini, distorsi yang dominan adalah distorsi horizontal. Oleh karena itu, sudut θ yang digunakan adalah sudut

pada bidang horizontal. Sudut θ dapat dicari dengan rumus berikut.

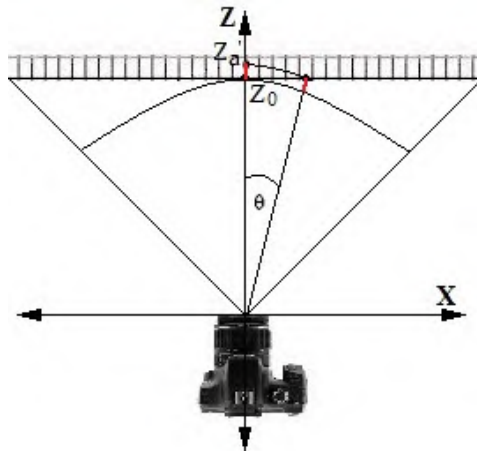
$$\theta_a = \tan^{-1} \frac{|x_0 - x_a|}{z_0}$$

4. Rotasi Sebesar θ terhadap Sumbu Y

Objek yang bergerak lurus menyebabkan koordinat z tidak berubah. Sehingga pada posisi a, nilai z_a sama dengan z_0 . Posisi tersebut (x_a , y_a , z_a) kemudian dirotasikan sebesar θ terhadap sumbu Y dengan menggunakan matriks rotasi. Sehingga didapatkan koordinat baru (x'_a , y'_a , z'_a) dengan cara berikut.

$$\begin{bmatrix} x'_a \\ y'_a \\ z'_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ y_a \\ z_a \end{bmatrix}$$

5. Mencari Nilai Distorsi (Δz) dan Persentasenya
Setelah dirotasikan sebesar θ terhadap sumbu Y, maka ilustrasi posisi z'_a seperti pada Gambar 3.12.



Gambar 3.12 Ilustrasi Posisi z'_a

Sehingga distorsi yang terjadi pada posisi a dapat dicari dengan rumus berikut.

$$\Delta z_a = z_a' - z_0$$

Setelah diketahui nilai distorsi pada titik a, maka persentase distorsi dapat dicari dengan rumus berikut.

$$\text{Persentase Distorsi} = \frac{\Delta z_a}{z_a'} \cdot 100\%$$

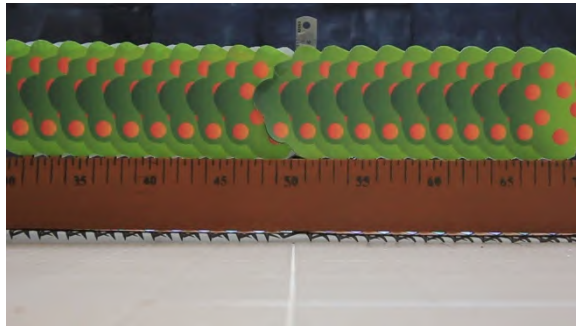
BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisis Gambar

Proses analisis yang dilakukan pertama kali adalah analisis gambar. Proses ini menghasilkan tiga data penting, yaitu skala, kecepatan universal (\tilde{V}_u), dan koordinat posisi.

4.1.1 Skala

Nilai skala didapatkan melalui pengamatan gambar mistar. Suatu mistar kayu yang terlihat jelas satuan centimeternya diletakkan secara horizontal, seperti pada Gambar 4.1, sehingga dapat diketahui jumlah pixel yang terwakili oleh jarak satu centimeter tersebut.



Gambar 4.1 Mistar Kayu dalam Posisi Horizontal

Pengambilan video untuk gerakan partikel dengan kecepatan konstan dilakukan dari jauh dan dekat untuk masing-masing *focal length*. Pengambilan dekat yaitu mengondisikan *field of view* sejauh 40 cm. Sedangkan pada pengambilan jauh, jarak kamera dan objek (d) dua kali lipat dari jarak (d) pengambilan dekat. Nilai skala diambil dari jarak satu centimeter mistar yang berada tepat di tengah *frame* karena bagian tersebut diyakini tidak mengalami distorsi. Tabel 4.1 berikut menyajikan nilai skala yang berlaku untuk masing-masing variasi tersebut.

Tabel 4.1 Faktor Skala

Focal Length	Kondisi	Kode	Jarak Kamera (cm)	Skala (pixel/cm)
10 mm	Dekat	Co	9	34
	Jauh	CF	18	23
22 mm	Dekat	Co	29.4	33
	Jauh	CF	58.8	20

4.1.2 Kecepatan Universal (\tilde{V}_u)

Perekaman video terhadap objek (kereta api mainan) yang bergerak konstan dilakukan sebanyak tiga kali dari jarak dekat dan dua kali dari jarak jauh untuk masing-masing *focal length*. Perekaman dilakukan lebih dari satu kali untuk memastikan apakah objek memang bergerak dengan kecepatan konstan. Sedangkan pengambilan dekat dan jauh dilakukan untuk mendapatkan informasi apakah variasi jarak memiliki pengaruh yang berarti. Pengamatan kemudian dilakukan pada rangkaian gambar hasil ekstraksi video-video tersebut. Tabel 4.2 berikut adalah data kecepatan universal objek yang direkam dengan *focal length* 10 mm.

Tabel 4.2 Data Kecepatan Universal pada *Focal Length* 10 mm

Video	Frame Awal	Frame Akhir	Batas Kanan	Batas Kiri	V_u (pixel/s)	Skala	V_u (cm/s)
Co1	188	410	1272	4	340.8248	34	10.0243
Co2	203	425	1271	5	340.2872		10.0084
Co3	218	440	1272	3	341.0935		10.0322
CF1	314	544	1068	191	227.5644	23	9.8941
CF2	299	524	1069	191	232.8642		10.1245

Sedangkan data kecepatan universal objek pada *focal length* 22 mm tersaji pada Tabel 4.3 berikut.

Tabel 4.3 Data Kecepatan Universal pada *Focal Length* 22 mm

Video	Frame Awal	Frame Akhir	Batas Kanan	Batas Kiri	V_u (pixel/s)	Skala	V_u (cm/s)
Co4	180	434	1274	8	297.5845	33	9.0177
Co5	156	408	1272	9	299.2262		9.0675
Co6	170	422	1272	10	298.9892		9.0603
CF3	304	577	1028	207	179.6012	20	8.9801
CF4	283	553	1026	207	181.1471		9.0574

Jika dilakukan perbandingan data antara kedua *focal length*, tabel-tabel di atas menunjukkan adanya perbedaan kecepatan universal yang signifikan, yaitu sekitar 1 cm/s. Namun, baik pada *focal length* 10 mm maupun 22 mm, kondisi pengambilan dekat dan jauh menunjukkan selisih nilai kecepatan universal yang relatif kecil. Pada *focal length* 10 mm, selisih kecepatan universal untuk pengambilan jarak dekat dan jauh sekitar 0.1 cm/s (1%). Sedangkan pada *focal length* 22 mm, selisihnya hanya sekitar 0.03 cm/s (0.33%). Hal tersebut membuktikan bahwa objek memang bergerak dengan kecepatan konstan dan variasi jarak pengambilan video tidak memiliki pengaruh yang berarti terhadap analisis kecepatan universal. Namun, pengukuran kecepatan dengan *focal length* yang berbeda bisa memberikan hasil pengamatan yang berbeda pula.

4.1.3 Koordinat Posisi

Koordinat-koordinat diperoleh melalui pengamatan gambar dengan bantuan perangkat lunak Digital Photo Professional. Terdapat enam data koordinat posisi, yaitu:

1. Konstan – Dekat pada *Focal Length* 10 mm (Co2), tersaji dalam Lampiran A
2. Konstan – Jauh pada *Focal Length* 10 mm (CF2), tersaji dalam Lampiran B
3. Konstan – Dekat pada *Focal Length* 22 mm (Co6), tersaji dalam Lampiran C
4. Konstan – Jauh pada *Focal Length* 22 mm (CF4), tersaji dalam Lampiran D
5. Percepatan dan Perlambatan pada *Focal Length* 10 mm, tersaji dalam Lampiran E
6. Percepatan dan Perlambatan pada *Focal Length* 22 mm, tersaji dalam Lampiran F

4.2 Analisis Data

Berdasarkan data koordinat posisi, berbagai analisis dilakukan, antara lain analisis perpindahan, kecepatan, percepatan, dan distorsi.

1. Konstan – Dekat pada Focal Length 10 mm

Analisis perpindahan, kecepatan sesaat, dan tingkat kesalahan relatif dari gerakan objek berkecepatan konstan jarak dekat pada *focal length* 10 mm tersaji dalam Lampiran A.

2. Konstan – Jauh pada Focal Length 10 mm

Analisis perpindahan, kecepatan sesaat, dan tingkat kesalahan relatif dari gerakan objek berkecepatan konstan jarak jauh pada *focal length* 10 mm tersaji dalam Lampiran B.

3. Konstan – Dekat pada Focal Length 22 mm

Analisis perpindahan, kecepatan sesaat, dan tingkat kesalahan relatif dari gerakan objek berkecepatan konstan jarak dekat pada *focal length* 22 mm tersaji dalam Lampiran C.

4. Konstan – Jauh pada Focal Length 22 mm

Analisis perpindahan, kecepatan sesaat, dan tingkat kesalahan relatif dari gerakan objek berkecepatan konstan jarak jauh pada *focal length* 22 mm tersaji dalam Lampiran D.

5. Percepatan dan Perlambatan pada Focal Length 10 mm

Analisis perpindahan, kecepatan sesaat, dan percepatan sesaat dari gerakan objek dengan percepatan dan perlambatan pada *focal length* 10 mm tersaji dalam Lampiran E.

6. Percepatan dan Perlambatan pada Focal Length 22 mm

Analisis perpindahan, kecepatan sesaat, dan percepatan sesaat dari gerakan objek dengan

percepatan dan perlambatan pada *focal length* 22 mm tersaji dalam Lampiran F.

7. Distorsi pada Focal Length 10 mm

Analisis distorsi pada *focal length* 10 mm meliputi pencarian sudut θ , rotasi terhadap sumbu Y sebesar θ sehingga diperoleh koordinat baru, dan perhitungan persentase distorsi. Analisis tersebut dapat dilihat pada Lampiran G.

8. Distorsi pada Focal Length 22 mm

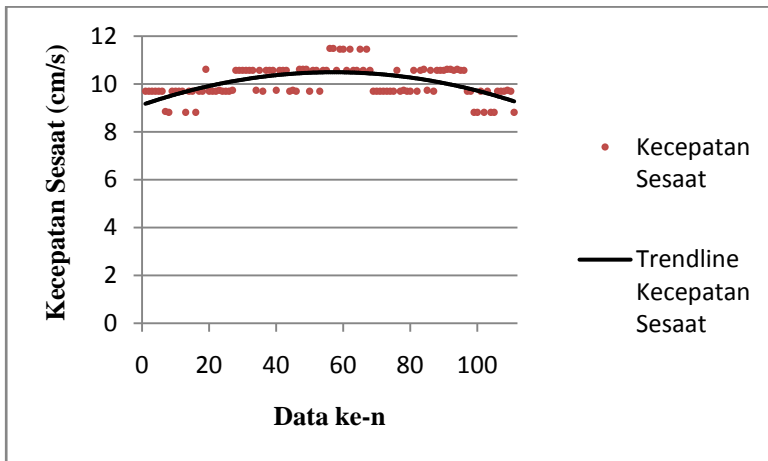
Analisis distorsi pada *focal length* 22 mm meliputi pencarian sudut θ , rotasi terhadap sumbu Y sebesar θ sehingga diperoleh koordinat baru, dan perhitungan persentase distorsi. Analisis tersebut dapat dilihat pada Lampiran H.

4.3 Pembahasan

Grafik-grafik yang dihasilkan melalui analisis data dijelaskan pada bagian ini. Grafik yang dibahas meliputi gerakan dengan kecepatan konstan, gerakan dengan percepatan dan perlambatan, serta distorsi pada *focal length* 10 mm dan 22 mm.

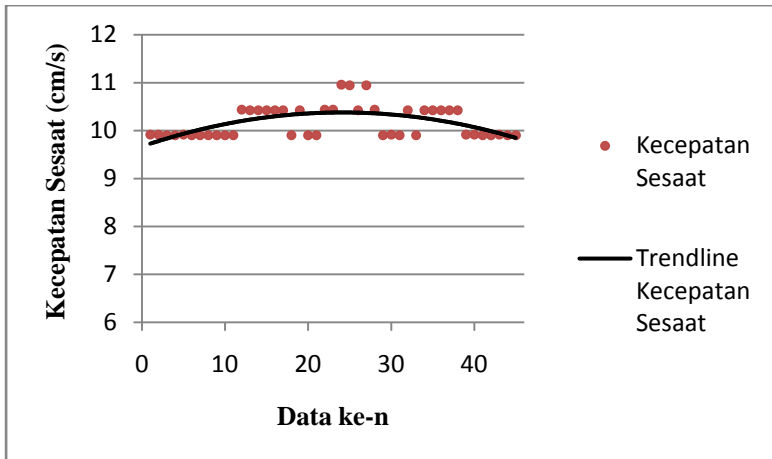
4.3.1 Gerakan dengan Kecepatan Konstan pada Focal Length 10 mm dan 22 mm

Pada bagian ini akan dibandingkan pengaruh *focal length* 10 mm dan 22 mm terhadap metode pengukuran kecepatan konstan dengan bantuan kamera DSLR.



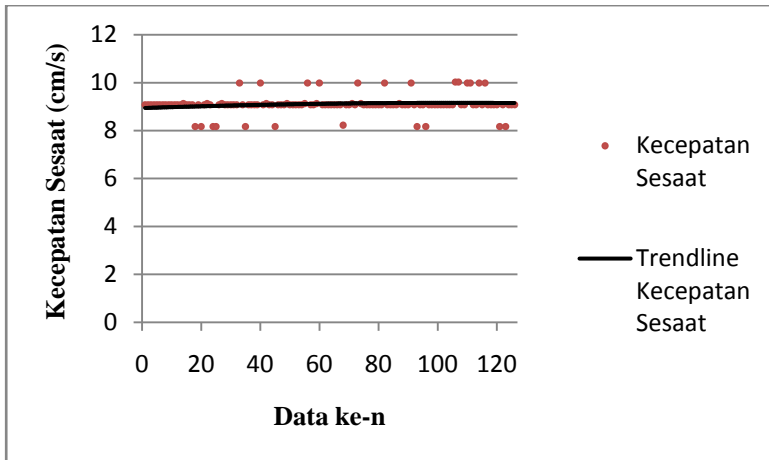
Gambar 4.2 Grafik Kecepatan Sesaat Konstan – Dekat pada *Focal Length* 10 mm

Gambar 4.2 menunjukkan adanya selisih kecepatan sesaat antara bagian tengah dan tepi *frame* pada perekaman gerakan objek berkecepatan konstan jarak dekat dengan *focal length* 10 mm. Selisih kecepatan sesaat tersebut bernilai sekitar 1.8 cm/s (15.63%). *Trendline* juga menunjukkan seolah-olah terjadi peningkatan kecepatan pada bagian tengah, kemudian terjadi penurunan kecepatan hingga bernilai seperti sedia kala.



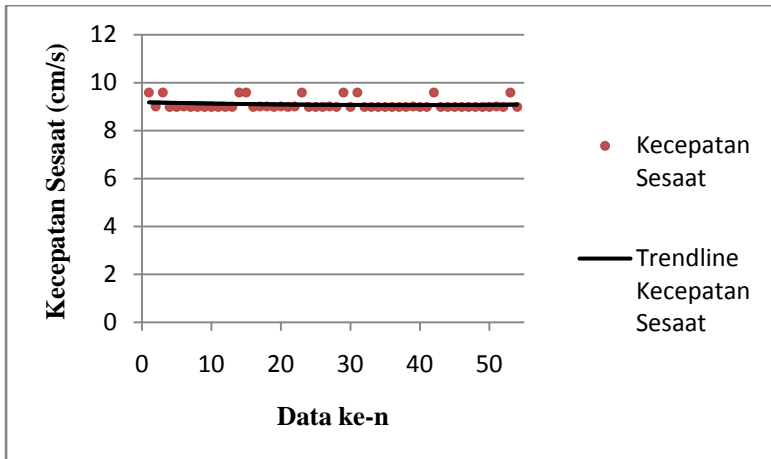
Gambar 4.3 Grafik Kecepatan Sesaat Konstan – Jauh pada *Focal Length* 10 mm

Gambar 4.3 menunjukkan adanya selisih kecepatan sesaat antara bagian tengah dan tepi *frame* pada perekaman gerakan objek berkecepatan konstan jarak jauh dengan *focal length* 10 mm. Selisih kecepatan sesaat tersebut bernilai sekitar 1 cm/s (9.5%). *Trendline* juga menunjukkan hal yang sama seperti pada Gambar 4.2. Hal ini membuktikan bahwa jarak pengambilan video tidak berpengaruh pada karakteristik suatu *focal length*, karena baik pada pengambilan jarak dekat maupun jauh terjadi distribusi data yang serupa.



Gambar 4.4 Grafik Kecepatan Sesaat Konstan – Dekat pada *Focal Length* 22 mm

Gambar 4.4 menunjukkan nilai kecepatan sesaat yang relatif homogen pada perekaman gerakan objek berkecepatan konstan jarak dekat dengan *focal length* 22 mm, yaitu sebesar 9.08 cm/s. Walaupun beberapa data memiliki nilai yang lebih tinggi dan lebih rendah, *trendline* membentuk garis linear yang menunjukkan bahwa *focal length* 22 mm relatif aman dari pengaruh distorsi.



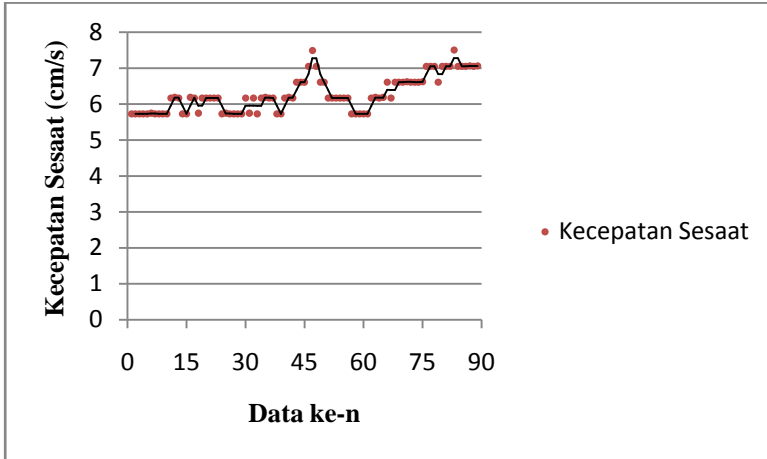
Gambar 4.5 Grafik Kecepatan Sesaat Konstan – Jauh pada *Focal Length* 22 mm

Gambar 4.5 menunjukkan bahwa nilai kecepatan sesaat pada perekaman gerakan objek berkecepatan konstan jarak jauh dengan *focal length* 22 mm cenderung seragam, yaitu sebesar 8.99 cm/s. Walaupun terdapat beberapa data yang bernilai lebih tinggi, *trendline* membentuk garis yang serupa seperti pada Gambar 4.4.

Jika dilakukan perbandingan antara kedua *focal length*, 22 mm (ekivalen 35 mm) tentunya lebih aman daripada 10 mm (ekivalen 16 mm) jika digunakan sebagai *focal length* untuk mengukur kecepatan partikel. Hal tersebut karena efek distorsi sangat kecil terhadap hasil perekaman video dengan *focal length* 22 mm.

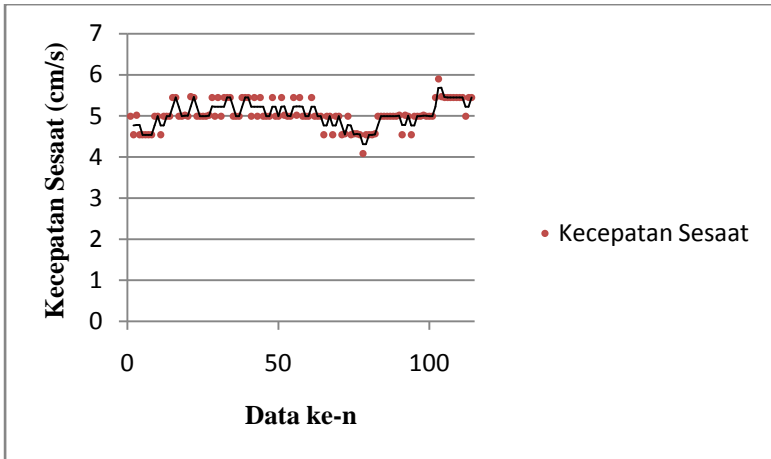
4.3.2 Gerakan dengan Percepatan dan Perlambatan pada Focal Length 10 dan 22 mm

Pengukuran percepatan dan/atau perlambatan tentunya sulit dilakukan jika perekaman objek menggunakan *focal length* 10 mm. Hal tersebut karena perubahan kecepatan akibat error dan percepatan itu sendiri sulit dibedakan.



Gambar 4.6 Grafik Kecepatan Sesaat pada Percepatan dan Perlambatan *Focal Length* 10 mm

Kereta api mainan bergerak dari kanan ke kiri. Berdasarkan Gambar 4.6, kecepatan sesaat memang terlihat mengalami penurunan setelah data ke-83. Hal ini disebabkan karena data ke-83 merupakan saat dimana terjadi tumbukan antara objek yang diamati dengan objek lain sehingga terjadi perlambatan. Namun ketika objek mendekati bagian tengah *frame*, kecepatan sesaat kembali naik hingga puncaknya bernilai sama ketika belum terjadi tumbukan. Jika merujuk pada grafik-grafik di Gambar 4.2 dan 4.3, terlihat peningkatan nilai kecepatan sesaat ketika mendekati posisi tengah *frame*. Hal tersebut terjadi karena pengaruh distorsi, karena seharusnya kecepatan konstan tidak menyebabkan terjadinya peningkatan nilai kecepatan sesaat.



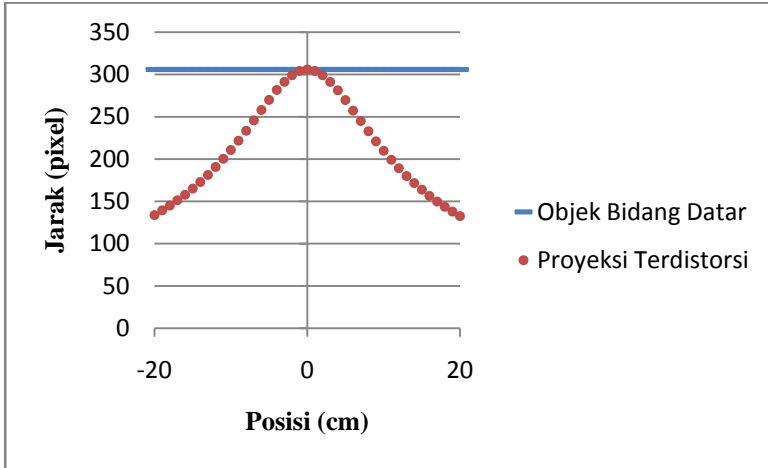
Gambar 4.7 Grafik Kecepatan Sesaat pada Percepatan dan Perlambatan *Focal Length* 22 mm

Objek juga bergerak dari kanan ke kiri. Gambar 4.7 menunjukkan adanya penurunan kecepatan sesaat setelah data ke-103. Hal ini disebabkan data ke-103 merupakan saat dimana terjadi tumbukan antara objek yang diamati dengan objek lain sehingga terjadi perlambatan. Kemudian terlihat adanya peningkatan kecepatan sesaat akibat momentum. Lalu nilai kecepatan sesaat cenderung sama hingga *frame* terakhir.

Pada dasarnya, pengukuran percepatan cukup sulit dilakukan dengan kamera yang hanya memiliki *frame rate* 59.94 fps seperti yang digunakan pada penelitian ini. Karena kamera tersebut masih jauh dari kategori *high-speed*. Namun, jika dibandingkan antara dua *focal length* yang digunakan pada penelitian ini, 22 mm (ekivalen 35 mm) masih lebih baik daripada 10 mm (ekivalen 16 mm) karena efek distorsi yang terlibat dalam perubahan kecepatan sesaat jauh lebih kecil.

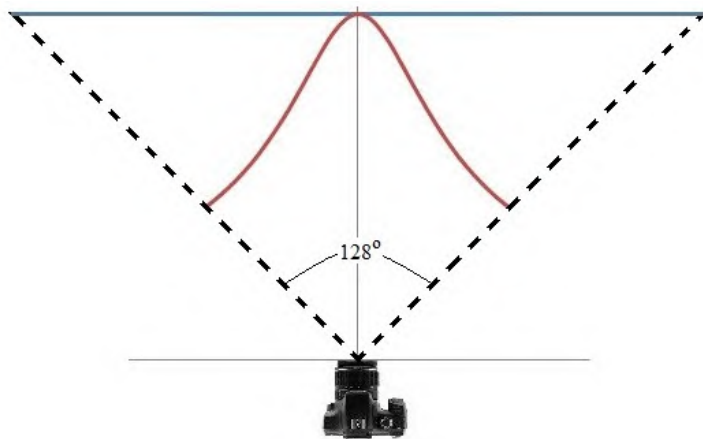
4.3.3 Distorsi pada Focal Length 10 dan 22 mm

Pada bagian ini dijelaskan bagaimana bentuk distorsi yang terjadi pada *focal length* 10 dan 22 mm. Dengan merujuk data pada Lampiran G, sudut (*angle of view*) yang dibentuk oleh *focal length* 10 mm adalah sekitar 128° dan distorsi pada bagian tepi mencapai 56%.



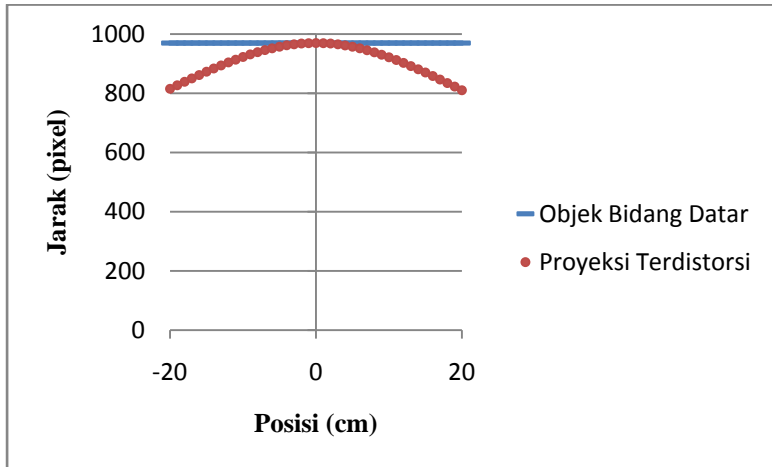
Gambar 4.8 Proyeksi Distorsi pada *Focal Length* 10 mm

Gambar 4.8 menunjukkan bagaimana distorsi pada *focal length* 10 mm terjadi. Proyeksi distorsi *focal length* 10 mm membentuk kurva yang tajam. Jika posisi kamera terletak pada titik origin, maka bentuk distorsinya adalah seperti Gambar 4.9 berikut.



Gambar 4.9 Distorsi *Focal Length* 10 mm

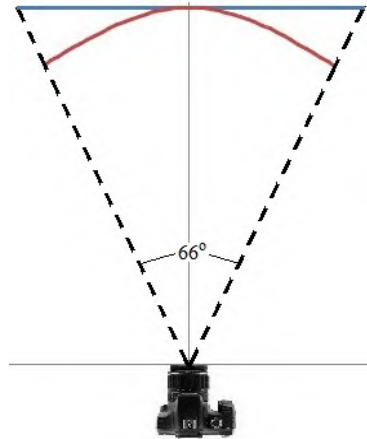
Dengan merujuk data pada Lampiran H, sudut (*angle of view*) yang dibentuk oleh *focal length* 22 mm adalah sekitar 66° dan distorsi pada bagian tepi hanya 16%.



Gambar 4.10 Proyeksi Distorsi pada *Focal Length* 22 mm

Gambar 4.10 menunjukkan bagaimana distorsi pada *focal length* 22 mm terjadi. Proyeksi distorsi *focal length* 22 mm

membentuk kurva yang jauh lebih landai. Jika posisi kamera terletak pada titik origin, maka bentuk distorsinya adalah seperti Gambar 4.11 berikut.



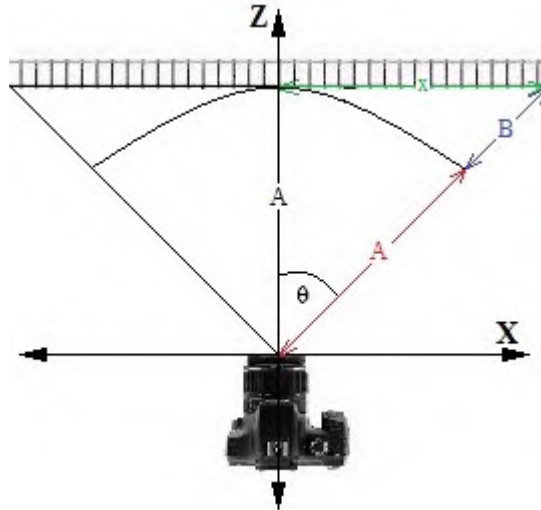
Gambar 4.11 Distorsi *Focal Length* 22 mm

Pada dasarnya, suatu lensa kamera DSLR sudah dilengkapi dengan sistem koreksi otomatis terhadap distorsi. Sehingga distorsi yang terjadi bisa diminimalisasi efeknya terhadap hasil pengambilan gambar atau perekaman video. Misalnya pada *focal length* 22 mm, distorsi yang terjadi pada bagian tepi bisa mencapai 16%, tetapi pada hasil perekaman video untuk kecepatan konstan tidak terjadi selisih nilai kecepatan sesaat antara bagian tepi dan tengah *frame*. Namun pada *focal length* 10 mm yang distorsinya terlampau besar, yaitu hingga 56%, efek distorsi masih tampak ketika digunakan untuk merekam gerakan berkecepatan konstan. Walaupun tingkat kesalahannya tidak sebesar distorsi yang terjadi. Oleh karena itu, pemilihan *focal length* yang tepat sangat penting untuk metode pengukuran kecepatan dengan bantuan kamera. Dan penelitian ini telah membuktikan bahwa *focal length* 22 mm (ekivalen 35 mm) relatif aman digunakan untuk metode tersebut.

4.4 Pemodelan Efek Distorsi

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, sistem koreksi otomatis suatu lensa menyebabkan berkurangnya efek distorsi terhadap hasil pengambilan gambar dan/atau perekaman video. Oleh karena itu, pada bagian ini akan dijelaskan suatu pemodelan efek distorsi. Langkah-langkah dalam memodelkan efek distorsi tersebut adalah:

1. Merancang rumus efek distorsi (B)



Gambar 4.12 Skema Pemodelan Efek Distorsi

Berdasarkan skema pemodelan pada Gambar 4.12, efek distorsi (B) dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$C = A + B, \text{ maka } B = C - A$$

$$x = A \cdot \tan(\theta)$$

$$C^2 = A^2 + x^2$$

$$B^2 = (C - A)^2$$

$$B^2 = C^2 - 2AC + A^2$$

$$B^2 = (A^2 + x^2) - 2A\sqrt{A^2 + x^2} + A^2$$

$$B^2 = (A^2 + A^2 \cdot \tan^2(\theta)) - 2A\sqrt{A^2 + x^2} + A^2$$

$$B^2 = 2A^2 + A^2 \cdot \tan^2(\theta) - 2A\sqrt{A^2 + A^2 \cdot \tan^2(\theta)}$$

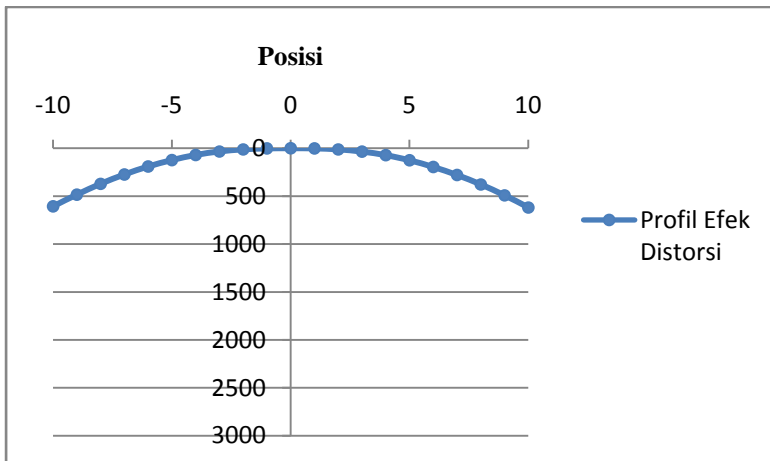
$$B^2 = 2A^2 + A^2 \cdot \tan^2(\theta) - 2A^2\sqrt{1 + \tan^2(\theta)}$$

$$B = \sqrt{(2A^2 + A^2 \cdot \tan^2(\theta) - 2A^2\sqrt{1 + \tan^2(\theta)})}$$

2. Menggambar grafik efek distorsi sebagai fungsi posisi
3. Membatasi bidang pengamatan pada posisi -10 sampai dengan 10
4. Melakukan operasi eksponensial terhadap rumus efek distorsi hingga ditemukan profil grafik yang menyerupai *trendline* kecepatan sesaat gerakan objek dengan kecepatan konstan

4.4.1 Pemodelan Efek Distorsi Focal Length 10 mm

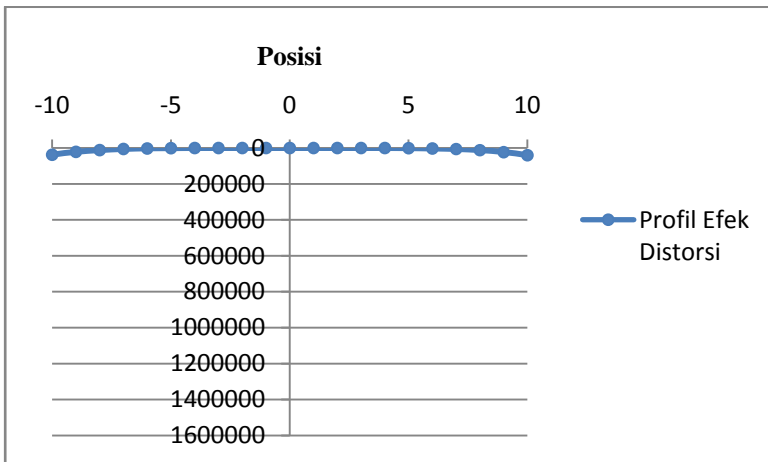
Gambar 4.2 dan Gambar 4.3 menunjukkan *trendline* kecepatan sesaat pada *focal length* 10 mm membentuk kurva. Hal tersebut terjadi karena kecepatan sesaat pada bagian tepi *frame* memiliki nilai yang lebih rendah daripada bagian tengah. Kurva tersebut juga dapat dianggap sebagai pendekatan efek distorsi yang terjadi pada *focal length* 10 mm. Dengan melakukan *trial and error* berupa operasi eksponensial terhadap rumus efek distorsi (B), maka diperoleh suatu angka eksponensial (e) yang menyebabkan profil efek distorsi menyerupai kurva yang terdapat pada Gambar 4.2 dan 4.3. Berikut adalah profil efek distorsi berpangkat (B^e) dengan angka eksponensial (e) sebesar 1.3.



Gambar 4.13 Profil Efek Distorsi *Focal Length* 10 mm ($e = 1.3$)

4.4.2 Pemodelan Efek Distorsi Focal Length 22 mm

Gambar 4.4 dan Gambar 4.5 menunjukkan *trendline* kecepatan sesaat pada *focal length* 22 mm membentuk garis linear. Hal tersebut terjadi karena kecepatan sesaat pada bagian tengah dan tepi *frame* memiliki nilai yang sama. Garis linear tersebut juga dapat dianggap sebagai pendekatan efek distorsi yang terjadi pada *focal length* 22 mm. Dengan melakukan *trial and error* berupa operasi eksponensial terhadap rumus efek distorsi (B), maka diperoleh suatu angka eksponensial (e) yang menyebabkan profil efek distorsi menyerupai garis linear yang terdapat pada Gambar 4.4 dan 4.5. Berikut adalah profil efek distorsi berpangkat (B^e) dengan angka eksponensial (e) sebesar 2.7.



Gambar 4.14 Profil Efek Distorsi *Focal Length* 22 mm ($e = 2.7$)

LAMPIRAN A

Tabel Data Konstan – Dekat pada *Focal Length* 10 mm

No.	Frame	X	Y	ΔX (px)	ΔY (px)	V_n (px/s)	V_n (cm/s)	V_{z0} (cm/s)	Error (%)
1	0425	5	386	11	0	329.67	9.70	11.49	15.63
2	0423	16	386	11	0	329.67	9.70	11.49	15.63
3	0421	27	386	11	0	329.67	9.70	11.49	15.63
4	0419	38	386	11	0	329.67	9.70	11.49	15.63
5	0417	49	386	11	0	329.67	9.70	11.49	15.63
6	0415	60	386	11	0	329.67	9.70	11.49	15.63
7	0413	71	386	10	1	301.19	8.86	11.49	22.92
8	0411	81	387	10	0	299.70	8.81	11.49	23.30
9	0409	91	387	11	0	329.67	9.70	11.49	15.63
10	0407	102	387	11	0	329.67	9.70	11.49	15.63
11	0405	113	387	11	0	329.67	9.70	11.49	15.63
12	0403	124	387	11	0	329.67	9.70	11.49	15.63
13	0401	135	387	10	0	299.70	8.81	11.49	23.30
14	0399	145	387	11	0	329.67	9.70	11.49	15.63
15	0397	156	387	11	0	329.67	9.70	11.49	15.63
16	0395	167	387	10	0	299.70	8.81	11.49	23.30
17	0393	177	387	11	0	329.67	9.70	11.49	15.63
18	0391	188	387	11	0	329.67	9.70	11.49	15.63
19	0389	199	387	12	1	360.89	10.61	11.49	7.65
20	0387	211	386	11	0	329.67	9.70	11.49	15.63
21	0385	222	386	11	0	329.67	9.70	11.49	15.63
22	0383	233	386	11	0	329.67	9.70	11.49	15.63
23	0381	244	386	11	1	331.03	9.74	11.49	15.29
24	0379	255	385	11	0	329.67	9.70	11.49	15.63
25	0377	266	385	11	0	329.67	9.70	11.49	15.63
26	0375	277	385	11	0	329.67	9.70	11.49	15.63
27	0373	288	385	11	1	331.03	9.74	11.49	15.29

No.	Frame	X	Y	ΔX (px)	ΔY (px)	V_n (px/s)	V_n (cm/s)	V_{z0} (cm/s)	Error (%)
28	0371	299	384	12	0	359.64	10.58	11.49	7.96
29	0369	311	384	12	0	359.64	10.58	11.49	7.96
30	0367	323	384	12	0	359.64	10.58	11.49	7.96
31	0365	335	384	12	0	359.64	10.58	11.49	7.96
32	0363	347	384	12	0	359.64	10.58	11.49	7.96
33	0361	359	384	12	0	359.64	10.58	11.49	7.96
34	0359	371	384	11	1	331.03	9.74	11.49	15.29
35	0357	382	385	12	0	359.64	10.58	11.49	7.96
36	0355	394	385	11	0	329.67	9.70	11.49	15.63
37	0353	405	385	12	0	359.64	10.58	11.49	7.96
38	0351	417	385	12	0	359.64	10.58	11.49	7.96
39	0349	429	385	12	0	359.64	10.58	11.49	7.96
40	0347	441	385	11	1	331.03	9.74	11.49	15.29
41	0345	452	386	12	0	359.64	10.58	11.49	7.96
42	0343	464	386	12	0	359.64	10.58	11.49	7.96
43	0341	476	386	12	0	359.64	10.58	11.49	7.96
44	0339	488	386	11	0	329.67	9.70	11.49	15.63
45	0337	499	386	11	1	331.03	9.74	11.49	15.29
46	0335	510	385	11	0	329.67	9.70	11.49	15.63
47	0333	521	385	12	1	360.89	10.61	11.49	7.65
48	0331	533	384	12	1	360.89	10.61	11.49	7.65
49	0329	545	385	12	1	360.89	10.61	11.49	7.65
50	0327	557	384	11	0	329.67	9.70	11.49	15.63
51	0325	568	384	12	0	359.64	10.58	11.49	7.96
52	0323	580	384	12	0	359.64	10.58	11.49	7.96
53	0321	592	384	11	0	329.67	9.70	11.49	15.63
54	0319	603	384	12	0	359.64	10.58	11.49	7.96
55	0317	615	384	12	0	359.64	10.58	11.49	7.96
56	0315	627	384	13	1	390.76	11.49	11.49	0.00
57	0313	640	383	13	1	390.76	11.49	11.49	0.00

No.	Frame	X	Y	ΔX (px)	ΔY (px)	V_n (px/s)	V_n (cm/s)	V_{z0} (cm/s)	Error (%)
58	0311	653	384	12	0	359.64	10.58	11.49	7.96
59	0309	665	384	13	0	389.61	11.46	11.49	0.29
60	0307	678	384	13	0	389.61	11.46	11.49	0.29
61	0305	691	384	12	0	359.64	10.58	11.49	7.96
62	0303	703	384	13	0	389.61	11.46	11.49	0.29
63	0301	716	384	12	0	359.64	10.58	11.49	7.96
64	0299	728	384	12	0	359.64	10.58	11.49	7.96
65	0297	740	384	13	0	389.61	11.46	11.49	0.29
66	0295	753	384	12	0	359.64	10.58	11.49	7.96
67	0293	765	384	13	0	389.61	11.46	11.49	0.29
68	0291	778	384	12	0	359.64	10.58	11.49	7.96
69	0289	790	384	11	0	329.67	9.70	11.49	15.63
70	0287	801	384	11	0	329.67	9.70	11.49	15.63
71	0285	812	384	11	0	329.67	9.70	11.49	15.63
72	0283	823	384	11	0	329.67	9.70	11.49	15.63
73	0281	834	384	11	0	329.67	9.70	11.49	15.63
74	0279	845	384	11	0	329.67	9.70	11.49	15.63
75	0277	856	384	11	0	329.67	9.70	11.49	15.63
76	0275	867	384	12	0	359.64	10.58	11.49	7.96
77	0273	879	384	11	0	329.67	9.70	11.49	15.63
78	0271	890	384	11	1	331.03	9.74	11.49	15.29
79	0269	901	383	11	0	329.67	9.70	11.49	15.63
80	0267	912	383	11	0	329.67	9.70	11.49	15.63
81	0265	923	383	12	0	359.64	10.58	11.49	7.96
82	0263	935	383	11	0	329.67	9.70	11.49	15.63
83	0261	946	383	12	0	359.64	10.58	11.49	7.96
84	0259	958	383	12	1	360.89	10.61	11.49	7.65
85	0257	970	382	11	1	331.03	9.74	11.49	15.29
86	0255	981	383	12	0	359.64	10.58	11.49	7.96
87	0253	993	383	11	0	329.67	9.70	11.49	15.63

No.	Frame	X	Y	ΔX (px)	ΔY (px)	V_n (px/s)	V_n (cm/s)	V_{z0} (cm/s)	Error (%)
88	0251	1004	383	12	0	359.64	10.58	11.49	7.96
89	0249	1016	383	12	0	359.64	10.58	11.49	7.96
90	0247	1028	383	12	0	359.64	10.58	11.49	7.96
91	0245	1040	383	12	1	360.89	10.61	11.49	7.65
92	0243	1052	384	12	1	360.89	10.61	11.49	7.65
93	0241	1064	383	12	0	359.64	10.58	11.49	7.96
94	0239	1076	383	12	1	360.89	10.61	11.49	7.65
95	0237	1088	384	12	0	359.64	10.58	11.49	7.96
96	0235	1100	384	12	0	359.64	10.58	11.49	7.96
97	0233	1112	384	11	0	329.67	9.70	11.49	15.63
98	0231	1123	384	11	0	329.67	9.70	11.49	15.63
99	0229	1134	384	10	0	299.70	8.81	11.49	23.30
100	0227	1144	384	10	0	299.70	8.81	11.49	23.30
101	0225	1154	384	11	0	329.67	9.70	11.49	15.63
102	0223	1165	384	10	0	299.70	8.81	11.49	23.30
103	0221	1175	384	11	0	329.67	9.70	11.49	15.63
104	0219	1186	384	10	0	299.70	8.81	11.49	23.30
105	0217	1196	384	10	0	299.70	8.81	11.49	23.30
106	0215	1206	384	11	0	329.67	9.70	11.49	15.63
107	0213	1217	384	11	0	329.67	9.70	11.49	15.63
108	0211	1228	384	11	0	329.67	9.70	11.49	15.63
109	0209	1239	384	11	1	331.03	9.74	11.49	15.29
110	0207	1250	383	11	0	329.67	9.70	11.49	15.63
111	0205	1261	383	10	0	299.70	8.81	11.49	23.30
112	0203	1271	383	-	-	-	-	-	-

LAMPIRAN B

Tabel Data Konstan – Jauh pada *Focal Length* 10 mm

No.	Frame	X	Y	ΔX (px)	ΔY (px)	V_n (px/s)	V_n (cm/s)	V_{z0} (cm/s)	Error (%)
1	0524	191	382	19	1	228.09	9.92	10.96	9.50
2	0519	210	381	19	1	228.09	9.92	10.96	9.50
3	0514	229	380	19	0	227.77	9.90	10.96	9.63
4	0509	248	380	19	0	227.77	9.90	10.96	9.63
5	0504	267	380	19	1	228.09	9.92	10.96	9.50
6	0499	286	381	19	0	227.77	9.90	10.96	9.63
7	0494	305	381	19	0	227.77	9.90	10.96	9.63
8	0489	324	381	19	0	227.77	9.90	10.96	9.63
9	0484	343	381	19	0	227.77	9.90	10.96	9.63
10	0479	362	381	19	0	227.77	9.90	10.96	9.63
11	0474	381	381	19	0	227.77	9.90	10.96	9.63
12	0469	400	381	20	1	240.06	10.44	10.96	4.75
13	0464	420	380	20	0	239.76	10.42	10.96	4.87
14	0459	440	380	20	0	239.76	10.42	10.96	4.87
15	0454	460	380	20	0	239.76	10.42	10.96	4.87
16	0449	480	380	20	0	239.76	10.42	10.96	4.87
17	0444	500	380	20	0	239.76	10.42	10.96	4.87
18	0439	520	380	19	0	227.77	9.90	10.96	9.63
19	0434	539	380	20	0	239.76	10.42	10.96	4.87
20	0429	559	380	19	0	227.77	9.90	10.96	9.63
21	0424	578	380	19	0	227.77	9.90	10.96	9.63
22	0419	597	380	20	1	240.06	10.44	10.96	4.75
23	0414	617	379	20	1	240.06	10.44	10.96	4.75
24	0409	637	380	21	1	252.03	10.96	10.96	0.00
25	0404	658	379	21	0	251.75	10.95	10.96	0.11
26	0399	679	379	20	0	239.76	10.42	10.96	4.87
27	0394	699	379	21	0	251.75	10.95	10.96	0.11
28	0389	720	379	20	1	240.06	10.44	10.96	4.75

No.	Frame	X	Y	ΔX (px)	ΔY (px)	V_n (px/s)	V_n (cm/s)	V_{z0} (cm/s)	Error (%)
29	0384	740	380	19	0	227.77	9.90	10.96	9.63
30	0379	759	380	19	1	228.09	9.92	10.96	9.50
31	0374	778	379	19	0	227.77	9.90	10.96	9.63
32	0369	797	379	20	0	239.76	10.42	10.96	4.87
33	0364	817	379	19	0	227.77	9.90	10.96	9.63
34	0359	836	379	20	0	239.76	10.42	10.96	4.87
35	0354	856	379	20	0	239.76	10.42	10.96	4.87
36	0349	876	379	20	0	239.76	10.42	10.96	4.87
37	0344	896	379	20	0	239.76	10.42	10.96	4.87
38	0339	916	379	20	0	239.76	10.42	10.96	4.87
39	0334	936	379	19	1	228.09	9.92	10.96	9.50
40	0329	955	380	19	1	228.09	9.92	10.96	9.50
41	0324	974	379	19	0	227.77	9.90	10.96	9.63
42	0319	993	379	19	0	227.77	9.90	10.96	9.63
43	0314	1012	379	19	1	228.09	9.92	10.96	9.50
44	0309	1031	378	19	0	227.77	9.90	10.96	9.63
45	0304	1050	378	19	0	227.77	9.90	10.96	9.63
46	0299	1069	378	-	-	-	-	-	-

LAMPIRAN C

Tabel Data Konstan – Dekat pada *Focal Length* 22 mm

No.	Frame	X	Y	ΔX (px)	ΔY (px)	V_n (px/s)	V_n (cm/s)	V_{z0} (cm/s)	Error (%)
1	0422	10	397	10	0	299.70	9.08	9.08	0.00
2	0420	20	397	10	0	299.70	9.08	9.08	0.00
3	0418	30	397	10	0	299.70	9.08	9.08	0.00
4	0416	40	397	10	0	299.70	9.08	9.08	0.00
5	0414	50	397	10	0	299.70	9.08	9.08	0.00
6	0412	60	397	10	0	299.70	9.08	9.08	0.00
7	0410	70	397	10	0	299.70	9.08	9.08	0.00
8	0408	80	397	10	0	299.70	9.08	9.08	0.00
9	0406	90	397	10	0	299.70	9.08	9.08	0.00
10	0404	100	397	10	0	299.70	9.08	9.08	0.00
11	0402	110	397	10	0	299.70	9.08	9.08	0.00
12	0400	120	397	10	0	299.70	9.08	9.08	0.00
13	0398	130	397	10	0	299.70	9.08	9.08	0.00
14	0396	140	397	10	1	301.19	9.13	9.08	0.50
15	0394	150	398	10	0	299.70	9.08	9.08	0.00
16	0392	160	398	10	0	299.70	9.08	9.08	0.00
17	0390	170	398	10	0	299.70	9.08	9.08	0.00
18	0388	180	398	9	0	269.73	8.17	9.08	10.00
19	0386	189	398	10	0	299.70	9.08	9.08	0.00
20	0384	199	398	9	0	269.73	8.17	9.08	10.00
21	0382	208	398	10	0	299.70	9.08	9.08	0.00
22	0380	218	398	10	1	301.19	9.13	9.08	0.50
23	0378	228	397	10	0	299.70	9.08	9.08	0.00
24	0376	238	397	9	0	269.73	8.17	9.08	10.00
25	0374	247	397	9	0	269.73	8.17	9.08	10.00
26	0372	256	397	10	0	299.70	9.08	9.08	0.00
27	0370	266	397	10	1	301.19	9.13	9.08	0.50

No.	Frame	X	Y	ΔX (px)	ΔY (px)	V_n (px/s)	V_n (cm/s)	V_{z0} (cm/s)	Error (%)
28	0368	276	396	10	0	299.70	9.08	9.08	0.00
29	0366	286	396	10	0	299.70	9.08	9.08	0.00
30	0364	296	396	10	0	299.70	9.08	9.08	0.00
31	0362	306	396	10	0	299.70	9.08	9.08	0.00
32	0360	316	396	10	0	299.70	9.08	9.08	0.00
33	0358	326	396	11	0	329.67	9.99	9.08	10.00
34	0356	337	396	10	0	299.70	9.08	9.08	0.00
35	0354	347	396	9	0	269.73	8.17	9.08	10.00
36	0352	356	396	10	0	299.70	9.08	9.08	0.00
37	0350	366	396	10	0	299.70	9.08	9.08	0.00
38	0348	376	396	10	0	299.70	9.08	9.08	0.00
39	0346	386	396	10	0	299.70	9.08	9.08	0.00
40	0344	396	396	11	0	329.67	9.99	9.08	10.00
41	0342	407	396	10	0	299.70	9.08	9.08	0.00
42	0340	417	396	10	1	301.19	9.13	9.08	0.50
43	0338	427	397	10	0	299.70	9.08	9.08	0.00
44	0336	437	397	10	0	299.70	9.08	9.08	0.00
45	0334	447	397	9	0	269.73	8.17	9.08	10.00
46	0332	456	397	10	0	299.70	9.08	9.08	0.00
47	0330	466	397	10	0	299.70	9.08	9.08	0.00
48	0328	476	397	10	0	299.70	9.08	9.08	0.00
49	0326	486	397	10	1	301.19	9.13	9.08	0.50
50	0324	496	396	10	0	299.70	9.08	9.08	0.00
51	0322	506	396	10	0	299.70	9.08	9.08	0.00
52	0320	516	396	10	0	299.70	9.08	9.08	0.00
53	0318	526	396	10	0	299.70	9.08	9.08	0.00
54	0316	536	396	10	0	299.70	9.08	9.08	0.00
55	0314	546	396	10	1	301.19	9.13	9.08	0.50
56	0312	556	395	11	0	329.67	9.99	9.08	10.00
57	0310	567	395	10	0	299.70	9.08	9.08	0.00

No.	Frame	X	Y	ΔX (px)	ΔY (px)	V_n (px/s)	V_n (cm/s)	V_{z0} (cm/s)	Error (%)
58	0308	577	395	10	0	299.70	9.08	9.08	0.00
59	0306	587	395	10	1	301.19	9.13	9.08	0.50
60	0304	597	396	11	0	329.67	9.99	9.08	10.00
61	0302	608	396	10	0	299.70	9.08	9.08	0.00
62	0300	618	396	10	0	299.70	9.08	9.08	0.00
63	0298	628	396	10	0	299.70	9.08	9.08	0.00
64	0296	638	396	10	0	299.70	9.08	9.08	0.00
65	0294	648	396	10	0	299.70	9.08	9.08	0.00
66	0292	658	396	10	0	299.70	9.08	9.08	0.00
67	0290	668	396	10	0	299.70	9.08	9.08	0.00
68	0288	678	396	9	1	271.39	8.22	9.08	9.45
69	0286	687	397	10	0	299.70	9.08	9.08	0.00
70	0284	697	397	10	0	299.70	9.08	9.08	0.00
71	0282	707	397	10	1	301.19	9.13	9.08	0.50
72	0280	717	396	10	0	299.70	9.08	9.08	0.00
73	0278	727	396	11	0	329.67	9.99	9.08	10.00
74	0276	738	396	10	1	301.19	9.13	9.08	0.50
75	0274	748	395	10	0	299.70	9.08	9.08	0.00
76	0272	758	395	10	0	299.70	9.08	9.08	0.00
77	0270	768	395	10	0	299.70	9.08	9.08	0.00
78	0268	778	395	10	0	299.70	9.08	9.08	0.00
79	0266	788	395	10	0	299.70	9.08	9.08	0.00
80	0264	798	395	10	0	299.70	9.08	9.08	0.00
81	0262	808	395	10	0	299.70	9.08	9.08	0.00
82	0260	818	395	11	0	329.67	9.99	9.08	10.00
83	0258	829	395	10	0	299.70	9.08	9.08	0.00
84	0256	839	395	10	0	299.70	9.08	9.08	0.00
85	0254	849	395	10	0	299.70	9.08	9.08	0.00
86	0252	859	395	10	0	299.70	9.08	9.08	0.00
87	0250	869	395	10	1	301.19	9.13	9.08	0.50

No.	Frame	X	Y	ΔX (px)	ΔY (px)	V_n (px/s)	V_n (cm/s)	V_{z0} (cm/s)	Error (%)
88	0248	879	396	10	0	299.70	9.08	9.08	0.00
89	0246	889	396	10	0	299.70	9.08	9.08	0.00
90	0244	899	396	10	0	299.70	9.08	9.08	0.00
91	0242	909	396	11	0	329.67	9.99	9.08	10.00
92	0240	920	396	10	0	299.70	9.08	9.08	0.00
93	0238	930	396	9	0	269.73	8.17	9.08	10.00
94	0236	939	396	10	0	299.70	9.08	9.08	0.00
95	0234	949	396	10	0	299.70	9.08	9.08	0.00
96	0232	959	396	9	0	269.73	8.17	9.08	10.00
97	0230	968	396	10	0	299.70	9.08	9.08	0.00
98	0228	978	396	10	0	299.70	9.08	9.08	0.00
99	0226	988	396	10	0	299.70	9.08	9.08	0.00
100	0224	998	396	10	0	299.70	9.08	9.08	0.00
101	0222	1008	396	10	0	299.70	9.08	9.08	0.00
102	0220	1018	396	10	0	299.70	9.08	9.08	0.00
103	0218	1028	396	10	0	299.70	9.08	9.08	0.00
104	0216	1038	396	10	0	299.70	9.08	9.08	0.00
105	0214	1048	396	10	0	299.70	9.08	9.08	0.00
106	0212	1058	396	11	1	331.03	10.03	9.08	10.45
107	0210	1069	395	11	1	331.03	10.03	9.08	10.45
108	0208	1080	396	10	0	299.70	9.08	9.08	0.00
109	0206	1090	396	10	0	299.70	9.08	9.08	0.00
110	0204	1100	396	11	0	329.67	9.99	9.08	10.00
111	0202	1111	396	11	0	329.67	9.99	9.08	10.00
112	0200	1122	396	10	0	299.70	9.08	9.08	0.00
113	0198	1132	396	10	0	299.70	9.08	9.08	0.00
114	0196	1142	396	11	0	329.67	9.99	9.08	10.00
115	0194	1153	396	10	0	299.70	9.08	9.08	0.00
116	0192	1163	396	11	0	329.67	9.99	9.08	10.00
117	0190	1174	396	10	0	299.70	9.08	9.08	0.00

No.	Frame	X	Y	ΔX (px)	ΔY (px)	V_n (px/s)	V_n (cm/s)	V_{z0} (cm/s)	Error (%)
118	0188	1184	396	10	0	299.70	9.08	9.08	0.00
119	0186	1194	396	10	0	299.70	9.08	9.08	0.00
120	0184	1204	396	10	0	299.70	9.08	9.08	0.00
121	0182	1214	396	9	0	269.73	8.17	9.08	10.00
122	0180	1223	396	10	0	299.70	9.08	9.08	0.00
123	0178	1233	396	9	0	269.73	8.17	9.08	10.00
124	0176	1242	396	10	0	299.70	9.08	9.08	0.00
125	0174	1252	396	10	0	299.70	9.08	9.08	0.00
126	0172	1262	396	10	0	299.70	9.08	9.08	0.00
127	0170	1272	396	-	-	-	-	-	-

LAMPIRAN DTabel Data Konstan – Jauh pada *Focal Length* 22 mm

No.	Frame	X	Y	ΔX (px)	ΔY (px)	V_n (px/s)	V_n (cm/s)	V_{Z0} (cm/s)	Error (%)
1	0553	207	392	16	0	191.81	9.59	8.99	6.67
2	0548	223	392	15	1	180.22	9.01	8.99	0.22
3	0543	238	393	16	0	191.81	9.59	8.99	6.67
4	0538	254	393	15	0	179.82	8.99	8.99	0.00
5	0533	269	393	15	0	179.82	8.99	8.99	0.00
6	0528	284	393	15	1	180.22	9.01	8.99	0.22
7	0523	299	392	15	0	179.82	8.99	8.99	0.00
8	0518	314	392	15	0	179.82	8.99	8.99	0.00
9	0513	329	392	15	0	179.82	8.99	8.99	0.00
10	0508	344	392	15	0	179.82	8.99	8.99	0.00
11	0503	359	392	15	0	179.82	8.99	8.99	0.00
12	0498	374	392	15	0	179.82	8.99	8.99	0.00
13	0493	389	392	15	0	179.82	8.99	8.99	0.00
14	0488	404	392	16	0	191.81	9.59	8.99	6.67
15	0483	420	392	16	0	191.81	9.59	8.99	6.67
16	0478	436	392	15	0	179.82	8.99	8.99	0.00
17	0473	451	392	15	1	180.22	9.01	8.99	0.22
18	0468	466	391	15	1	180.22	9.01	8.99	0.22
19	0463	481	390	15	0	179.82	8.99	8.99	0.00
20	0458	496	390	15	1	180.22	9.01	8.99	0.22
21	0453	511	389	15	0	179.82	8.99	8.99	0.00
22	0448	526	389	15	1	180.22	9.01	8.99	0.22
23	0443	541	390	16	0	191.81	9.59	8.99	6.67
24	0438	557	390	15	0	179.82	8.99	8.99	0.00
25	0433	572	390	15	0	179.82	8.99	8.99	0.00
26	0428	587	390	15	0	179.82	8.99	8.99	0.00
27	0423	602	390	15	1	180.22	9.01	8.99	0.22

No.	Frame	X	Y	ΔX (px)	ΔY (px)	V_n (px/s)	V_n (cm/s)	V_{z0} (cm/s)	Error (%)
28	0418	617	389	15	0	179.82	8.99	8.99	0.00
29	0413	632	389	16	0	191.81	9.59	8.99	6.67
30	0408	648	389	15	0	179.82	8.99	8.99	0.00
31	0403	663	389	16	0	191.81	9.59	8.99	6.67
32	0398	679	389	15	0	179.82	8.99	8.99	0.00
33	0393	694	389	15	0	179.82	8.99	8.99	0.00
34	0388	709	389	15	0	179.82	8.99	8.99	0.00
35	0383	724	389	15	0	179.82	8.99	8.99	0.00
36	0378	739	389	15	0	179.82	8.99	8.99	0.00
37	0373	754	389	15	0	179.82	8.99	8.99	0.00
38	0368	769	389	15	0	179.82	8.99	8.99	0.00
39	0363	784	389	15	1	180.22	9.01	8.99	0.22
40	0358	799	388	15	0	179.82	8.99	8.99	0.00
41	0353	814	388	15	0	179.82	8.99	8.99	0.00
42	0348	829	388	16	0	191.81	9.59	8.99	6.67
43	0343	845	388	15	0	179.82	8.99	8.99	0.00
44	0338	860	388	15	0	179.82	8.99	8.99	0.00
45	0333	875	388	15	0	179.82	8.99	8.99	0.00
46	0328	890	388	15	0	179.82	8.99	8.99	0.00
47	0323	905	388	15	0	179.82	8.99	8.99	0.00
48	0318	920	388	15	0	179.82	8.99	8.99	0.00
49	0313	935	388	15	0	179.82	8.99	8.99	0.00
50	0308	950	388	15	0	179.82	8.99	8.99	0.00
51	0303	965	388	15	1	180.22	9.01	8.99	0.22
52	0298	980	387	15	0	179.82	8.99	8.99	0.00
53	0293	995	387	16	0	191.81	9.59	8.99	6.67
54	0288	1011	387	15	0	179.82	8.99	8.99	0.00
55	0283	1026	387	-	-	-	-	-	-

LAMPIRAN ETabel Data Percepatan dan Perlambatan *Focal Length* 10 mm

No.	Frame	X	Y	ΔX (px)	ΔY (px)	V_n (px/s)	V_n (cm/s)	α_n (cm/s ²)
1	0741	5	386	13	0	194.81	5.73	0.00
2	0737	18	386	13	0	194.81	5.73	0.00
3	0733	31	386	13	0	194.81	5.73	0.00
4	0729	44	386	13	0	194.81	5.73	0.00
5	0725	57	386	13	0	194.81	5.73	0.25
6	0721	70	386	13	1	195.38	5.75	0.25
7	0717	83	387	13	0	194.81	5.73	0.00
8	0713	96	387	13	0	194.81	5.73	0.00
9	0709	109	387	13	0	194.81	5.73	0.00
10	0705	122	387	13	0	194.81	5.73	6.60
11	0701	135	387	14	0	209.79	6.17	0.24
12	0697	149	387	14	1	210.32	6.19	0.24
13	0693	163	386	14	0	209.79	6.17	6.60
14	0689	177	386	13	0	194.81	5.73	0.00
15	0685	190	386	13	0	194.81	5.73	6.84
16	0681	203	386	14	1	210.32	6.19	0.24
17	0677	217	385	14	0	209.79	6.17	6.35
18	0673	231	385	13	1	195.38	5.75	6.35
19	0669	244	384	14	0	209.79	6.17	0.00
20	0665	258	384	14	0	209.79	6.17	0.00
21	0661	272	384	14	0	209.79	6.17	0.00
22	0657	286	384	14	0	209.79	6.17	0.00
23	0653	300	384	14	0	209.79	6.17	6.60
24	0649	314	384	13	0	194.81	5.73	0.25
25	0645	327	384	13	1	195.38	5.75	0.25
26	0641	340	385	13	0	194.81	5.73	0.00
27	0637	353	385	13	0	194.81	5.73	0.00

No.	Frame	X	Y	ΔX (px)	ΔY (px)	V_n (px/s)	V_n (cm/s)	α_n (cm/s ²)
28	0633	366	385	13	0	194.81	5.73	0.00
29	0629	379	385	13	0	194.81	5.73	6.60
30	0625	392	385	14	0	209.79	6.17	6.35
31	0621	406	385	13	1	195.38	5.75	6.35
32	0617	419	386	14	0	209.79	6.17	6.60
33	0613	433	386	13	0	194.81	5.73	6.60
34	0609	446	386	14	0	209.79	6.17	0.24
35	0605	460	386	14	1	210.32	6.19	0.24
36	0601	474	385	14	0	209.79	6.17	0.00
37	0597	488	385	14	0	209.79	6.17	6.60
38	0593	502	385	13	0	194.81	5.73	0.00
39	0589	515	385	13	0	194.81	5.73	6.60
40	0585	528	385	14	0	209.79	6.17	0.24
41	0581	542	385	14	1	210.32	6.19	0.24
42	0577	556	384	14	0	209.79	6.17	6.60
43	0573	570	384	15	0	224.78	6.61	0.00
44	0569	585	384	15	0	224.78	6.61	0.00
45	0565	600	384	15	0	224.78	6.61	6.60
46	0561	615	384	16	0	239.76	7.05	6.60
47	0557	631	384	17	0	254.75	7.49	6.60
48	0553	648	384	16	0	239.76	7.05	6.60
49	0549	664	384	15	0	224.78	6.61	0.00
50	0545	679	384	15	0	224.78	6.61	6.60
51	0541	694	384	14	0	209.79	6.17	0.00
52	0537	708	384	14	0	209.79	6.17	0.00
53	0533	722	384	14	0	209.79	6.17	0.00
54	0529	736	384	14	0	209.79	6.17	0.00
55	0525	750	384	14	0	209.79	6.17	0.00
56	0521	764	384	14	0	209.79	6.17	6.60

No.	Frame	X	Y	ΔX (px)	ΔY (px)	V_n (px/s)	V_n (cm/s)	α_n (cm/s ²)
57	0517	778	384	13	0	194.81	5.73	0.00
58	0513	791	384	13	0	194.81	5.73	0.00
59	0509	804	384	13	0	194.81	5.73	0.00
60	0505	817	384	13	0	194.81	5.73	0.00
61	0501	830	384	13	0	194.81	5.73	6.60
62	0497	843	384	14	0	209.79	6.17	0.24
63	0493	857	384	14	1	210.32	6.19	0.24
64	0489	871	383	14	0	209.79	6.17	0.24
65	0485	885	383	14	1	210.32	6.19	6.37
66	0481	899	382	15	0	224.78	6.61	6.60
67	0477	914	382	14	0	209.79	6.17	6.60
68	0473	928	382	15	0	224.78	6.61	0.00
69	0469	943	382	15	0	224.78	6.61	0.00
70	0465	958	382	15	0	224.78	6.61	0.22
71	0461	973	382	15	1	225.27	6.63	0.22
72	0457	988	383	15	0	224.78	6.61	0.00
73	0453	1003	383	15	0	224.78	6.61	0.00
74	0449	1018	383	15	0	224.78	6.61	0.22
75	0445	1033	383	15	1	225.27	6.63	6.38
76	0441	1048	384	16	0	239.76	7.05	0.00
77	0437	1064	384	16	0	239.76	7.05	0.00
78	0433	1080	384	16	0	239.76	7.05	6.60
79	0429	1096	384	15	0	224.78	6.61	6.60
80	0425	1111	384	16	0	239.76	7.05	0.00
81	0421	1127	384	16	0	239.76	7.05	0.00
82	0417	1143	384	16	0	239.76	7.05	6.80
83	0413	1159	384	17	1	255.19	7.51	6.80
84	0409	1176	383	16	0	239.76	7.05	0.00
85	0405	1192	383	16	0	239.76	7.05	0.00

No.	Frame	X	Y	ΔX (px)	ΔY (px)	V_n (px/s)	V_n (cm/s)	α_n (cm/s ²)
86	0401	1208	383	16	0	239.76	7.05	0.21
87	0397	1224	383	16	1	240.23	7.07	0.21
88	0393	1240	382	16	0	239.76	7.05	0.21
89	0389	1256	382	16	1	240.23	7.07	-
90	0385	1272	383	-	-	-	-	-

LAMPIRAN FTabel Data Percepatan dan Perlambatan *Focal Length* 22 mm

No.	Frame	X	Y	ΔX (px)	ΔY (px)	V_n (px/s)	V_n (cm/s)	α_n (cm/s ²)
1	0844	9	398	11	0	164.84	5.00	6.80
2	0840	20	398	10	0	149.85	4.54	7.11
3	0836	30	398	11	1	165.51	5.02	7.11
4	0832	41	397	10	0	149.85	4.54	0.00
5	0828	51	397	10	0	149.85	4.54	0.00
6	0824	61	397	10	0	149.85	4.54	0.00
7	0820	71	397	10	0	149.85	4.54	0.00
8	0816	81	397	10	0	149.85	4.54	6.80
9	0812	91	397	11	0	164.84	5.00	0.00
10	0808	102	397	11	0	164.84	5.00	6.80
11	0804	113	397	10	0	149.85	4.54	6.80
12	0800	123	397	11	0	164.84	5.00	0.00
13	0796	134	397	11	0	164.84	5.00	0.00
14	0792	145	397	11	0	164.84	5.00	6.80
15	0788	156	397	12	0	179.82	5.45	0.00
16	0784	168	397	12	0	179.82	5.45	6.80
17	0780	180	397	11	0	164.84	5.00	0.00
18	0776	191	397	11	0	164.84	5.00	0.31
19	0772	202	397	11	1	165.51	5.02	0.31
20	0768	213	398	11	0	164.84	5.00	7.09
21	0764	224	398	12	1	180.44	5.47	0.28
22	0760	236	397	12	0	179.82	5.45	6.80
23	0756	248	397	11	0	164.84	5.00	0.00
24	0752	259	397	11	0	164.84	5.00	0.00
25	0748	270	397	11	0	164.84	5.00	0.00
26	0744	281	397	11	0	164.84	5.00	0.31
27	0740	292	397	11	1	165.51	5.02	6.50

No.	Frame	X	Y	ΔX (px)	ΔY (px)	V_n (px/s)	V_n (cm/s)	α_n (cm/s ²)
28	0736	303	396	12	0	179.82	5.45	6.80
29	0732	315	396	11	0	164.84	5.00	6.80
30	0728	326	396	12	0	179.82	5.45	6.80
31	0724	338	396	11	0	164.84	5.00	6.80
32	0720	349	396	12	0	179.82	5.45	0.00
33	0716	361	396	12	0	179.82	5.45	0.00
34	0712	373	396	12	0	179.82	5.45	6.80
35	0708	385	396	11	0	164.84	5.00	0.00
36	0704	396	396	11	0	164.84	5.00	0.00
37	0700	407	396	11	0	164.84	5.00	6.80
38	0696	418	396	12	0	179.82	5.45	0.00
39	0692	430	396	12	0	179.82	5.45	0.00
40	0688	442	396	12	0	179.82	5.45	6.80
41	0684	454	396	11	0	164.84	5.00	6.80
42	0680	465	396	12	0	179.82	5.45	6.80
43	0676	477	396	11	0	164.84	5.00	6.80
44	0672	488	396	12	0	179.82	5.45	6.80
45	0668	500	396	11	0	164.84	5.00	0.00
46	0664	511	396	11	0	164.84	5.00	0.00
47	0660	522	396	11	0	164.84	5.00	6.80
48	0656	533	396	12	0	179.82	5.45	6.80
49	0652	545	396	11	0	164.84	5.00	0.00
50	0648	556	396	11	0	164.84	5.00	6.80
51	0644	567	396	12	0	179.82	5.45	6.50
52	0640	579	396	11	1	165.51	5.02	0.31
53	0636	590	395	11	0	164.84	5.00	0.00
54	0632	601	395	11	0	164.84	5.00	6.80
55	0628	612	395	12	0	179.82	5.45	6.50
56	0624	624	395	11	1	165.51	5.02	6.50

No.	Frame	X	Y	ΔX (px)	ΔY (px)	V_n (px/s)	V_n (cm/s)	α_n (cm/s ²)
57	0620	635	396	12	0	179.82	5.45	6.80
58	0616	647	396	11	0	164.84	5.00	0.00
59	0612	658	396	11	0	164.84	5.00	0.00
60	0608	669	396	11	0	164.84	5.00	6.80
61	0604	680	396	12	0	179.82	5.45	6.80
62	0600	692	396	11	0	164.84	5.00	0.00
63	0596	703	396	11	0	164.84	5.00	0.00
64	0592	714	396	11	0	164.84	5.00	6.80
65	0588	725	396	10	0	149.85	4.54	6.80
66	0584	735	396	11	0	164.84	5.00	0.00
67	0580	746	396	11	0	164.84	5.00	6.80
68	0576	757	396	10	0	149.85	4.54	6.80
69	0572	767	396	11	0	164.84	5.00	0.00
70	0568	778	396	11	0	164.84	5.00	6.80
71	0564	789	396	10	0	149.85	4.54	0.34
72	0560	799	396	10	1	150.60	4.56	6.47
73	0556	809	395	11	0	164.84	5.00	6.80
74	0552	820	395	10	0	149.85	4.54	0.34
75	0548	830	395	10	1	150.60	4.56	0.00
76	0544	840	394	10	1	150.60	4.56	0.34
77	0540	850	395	10	0	149.85	4.54	6.80
78	0536	860	395	9	0	134.87	4.09	6.80
79	0532	869	395	10	0	149.85	4.54	0.00
80	0528	879	395	10	0	149.85	4.54	0.00
81	0524	889	395	10	0	149.85	4.54	0.34
82	0520	899	395	10	1	150.60	4.56	6.47
83	0516	909	396	11	0	164.84	5.00	0.00
84	0512	920	396	11	0	164.84	5.00	0.00
85	0508	931	396	11	0	164.84	5.00	0.00

No.	Frame	X	Y	ΔX (px)	ΔY (px)	V_n (px/s)	V_n (cm/s)	α_n (cm/s ²)
86	0504	942	396	11	0	164.84	5.00	0.00
87	0500	953	396	11	0	164.84	5.00	0.00
88	0496	964	396	11	0	164.84	5.00	0.00
89	0492	975	396	11	0	164.84	5.00	0.31
90	0488	986	396	11	1	165.51	5.02	7.11
91	0484	997	397	10	0	149.85	4.54	7.11
92	0480	1007	397	11	1	165.51	5.02	0.31
93	0476	1018	396	11	0	164.84	5.00	6.80
94	0472	1029	396	10	0	149.85	4.54	6.80
95	0468	1039	396	11	0	164.84	5.00	0.00
96	0464	1050	396	11	0	164.84	5.00	0.00
97	0460	1061	396	11	0	164.84	5.00	0.31
98	0456	1072	396	11	1	165.51	5.02	0.31
99	0452	1083	395	11	0	164.84	5.00	0.00
100	0448	1094	395	11	0	164.84	5.00	0.00
101	0444	1105	395	11	0	164.84	5.00	6.80
102	0440	1116	395	12	0	179.82	5.45	6.80
103	0436	1128	395	13	0	194.81	5.90	6.52
104	0432	1141	395	12	1	180.44	5.47	0.28
105	0428	1153	396	12	0	179.82	5.45	0.00
106	0424	1165	396	12	0	179.82	5.45	0.00
107	0420	1177	396	12	0	179.82	5.45	0.00
108	0416	1189	396	12	0	179.82	5.45	0.00
109	0412	1201	396	12	0	179.82	5.45	0.00
110	0408	1213	396	12	0	179.82	5.45	0.00
111	0404	1225	396	12	0	179.82	5.45	6.80
112	0400	1237	396	11	0	164.84	5.00	6.80
113	0396	1248	396	12	0	179.82	5.45	0.00
114	0392	1260	396	12	0	179.82	5.45	-

No.	Frame	X	Y	ΔX (px)	ΔY (px)	V_n (px/s)	V_n (cm/s)	α_n (cm/s ²)
115	0388	1272	396	-	-	-	-	-

LAMPIRAN G

Tabel Data Distorsi *Focal Length* 10 mm

Titik	X	Y	Z	θ (rad)	θ (deg)	X'	Y'	Z'	Distorsi (px)	%
-20	10	335	306	1.12	64.06	0	335	699.48	393.48	56.25
-19	41	335	306	1.10	62.90	-1E-13	335	671.74	365.74	54.45
-18	71	335	306	1.08	61.69	0	335	645.18	339.18	52.57
-17	101	335	306	1.05	60.37	-6E-14	335	618.93	312.93	50.56
-16	131	335	306	1.03	58.94	6E-14	335	593.04	287.04	48.40
-15	162	335	306	1.00	57.32	0	335	566.71	260.71	46.00
-14	192	335	306	0.97	55.61	3E-14	335	541.71	235.71	43.51
-13	223	335	306	0.94	53.66	6E-14	335	516.42	210.42	40.75
-12	255	335	306	0.90	51.45	0	335	491.01	185.01	37.68
-11	286	335	306	0.86	49.08	0	335	467.17	161.17	34.50
-10	317	335	306	0.81	46.46	0	335	444.21	138.21	31.11
-9	348	335	306	0.76	43.56	-3E-14	335	422.28	116.28	27.54
-8	380	335	306	0.70	40.24	0	335	400.90	94.90	23.67
-7	412	335	306	0.64	36.57	-3E-14	335	381.01	75.01	19.69
-6	444	335	306	0.57	32.51	-3E-14	335	362.85	56.85	15.67
-5	476	335	306	0.49	28.04	0	335	346.71	40.71	11.74
-4	509	335	306	0.40	23.02	-1E-14	335	332.47	26.47	7.96
-3	541	335	306	0.31	17.76	0	335	321.31	15.31	4.76
-2	573	335	306	0.21	12.17	0	335	313.04	7.04	2.25
-1	606	335	306	0.11	6.16	0	335	307.77	1.77	0.58
0	639	335	306	0.00	0.00	0	335	306.00	0.00	0.00
1	672	335	306	0.11	6.16	0	335	307.77	1.77	0.58
2	705	335	306	0.21	12.17	0	335	313.04	7.04	2.25
3	738	335	306	0.31	17.93	-1E-14	335	321.62	15.62	4.86
4	770	335	306	0.40	23.18	0	335	332.86	26.86	8.07
5	803	335	306	0.49	28.19	-3E-14	335	347.18	41.18	11.86
6	836	335	306	0.57	32.77	-6E-14	335	363.93	57.93	15.92
7	868	335	306	0.64	36.81	3E-14	335	382.20	76.20	19.94
8	900	335	306	0.71	40.46	-3E-14	335	402.19	96.19	23.92

Titik	X	Y	Z	θ (rad)	θ (deg)	X'	Y'	Z'	Distorsi (px)	%
9	932	335	306	0.76	43.76	-3E-14	335	423.66	117.66	27.77
10	964	335	306	0.82	46.72	0	335	446.39	140.39	31.45
11	996	335	306	0.86	49.40	-3E-14	335	470.20	164.20	34.92
12	1028	335	306	0.90	51.81	3E-14	335	494.93	188.93	38.17
13	1060	335	306	0.94	53.99	-3E-14	335	520.46	214.46	41.21
14	1091	335	306	0.98	55.90	0	335	545.84	239.84	43.94
15	1122	335	306	1.01	57.64	6E-14	335	571.77	265.77	46.48
16	1153	335	306	1.03	59.23	0	335	598.19	292.19	48.85
17	1184	335	306	1.06	60.69	6E-14	335	625.03	319.03	51.04
18	1215	335	306	1.08	62.02	6E-14	335	652.24	346.24	53.08
19	1245	335	306	1.10	63.21	-6E-14	335	678.88	372.88	54.93
20	1275	335	306	1.12	64.31	0	335	705.78	399.78	56.64

LAMPIRAN H

Tabel Data Distorsi *Focal Length* 22 mm

Titik	X	Y	Z	θ (rad)	θ (deg)	X'	Y'	Z'	Distorsi (px)	%
-20	7	349	970	0.57	32.84	0	349	1154.5	184.46	15.98
-19	38	349	970	0.55	31.53	0	349	1137.9	167.95	14.76
-18	70	349	970	0.53	30.13	0	349	1121.5	151.55	13.51
-17	101	349	970	0.50	28.74	6E-14	349	1106.3	136.31	12.32
-16	132	349	970	0.48	27.32	6E-14	349	1091.7	121.74	11.15
-15	163	349	970	0.45	25.85	6E-14	349	1077.9	107.87	10.01
-14	194	349	970	0.42	24.35	0	349	1064.7	94.72	8.90
-13	225	349	970	0.40	22.81	0	349	1052.3	82.31	7.82
-12	256	349	970	0.37	21.24	6E-14	349	1040.7	70.69	6.79
-11	287	349	970	0.34	19.63	6E-14	349	1029.9	59.86	5.81
-10	319	349	970	0.31	17.94	0	349	1019.6	49.56	4.86
-9	350	349	970	0.28	16.26	6E-14	349	1010.4	40.44	4.00
-8	381	349	970	0.25	14.56	0	349	1002.2	32.20	3.21
-7	413	349	970	0.22	12.78	0	349	994.6	24.64	2.48
-6	444	349	970	0.19	11.03	-3E-14	349	988.2	18.24	1.85
-5	475	349	970	0.16	9.25	-3E-14	349	982.8	12.78	1.30
-4	507	349	970	0.13	7.40	1E-14	349	978.1	8.15	0.83
-3	538	349	970	0.10	5.59	0	349	974.6	4.64	0.48
-2	569	349	970	0.07	3.77	0	349	972.1	2.11	0.22
-1	601	349	970	0.03	1.89	0	349	970.5	0.53	0.05
0	633	349	970	0.00	0.00	0	349	970.0	0.00	0.00
1	665	349	970	0.03	1.89	0	349	970.5	0.53	0.05
2	696	349	970	0.06	3.72	-7E-15	349	972.0	2.04	0.21
3	728	349	970	0.10	5.59	0	349	974.6	4.64	0.48
4	760	349	970	0.13	7.46	-1E-14	349	978.3	8.28	0.85
5	792	349	970	0.16	9.31	0	349	982.9	12.95	1.32
6	824	349	970	0.19	11.14	0	349	988.6	18.63	1.88
7	855	349	970	0.22	12.89	0	349	995.1	25.08	2.52
8	887	349	970	0.26	14.67	-3E-14	349	1002.7	32.70	3.26

Titik	X	Y	Z	θ (rad)	θ (deg)	X'	Y'	Z'	Distorsi (px)	%
9	919	349	970	0.29	16.43	0	349	1011.3	41.28	4.08
10	951	349	970	0.32	18.15	-6E-14	349	1020.8	50.80	4.98
11	983	349	970	0.35	19.84	0	349	1031.2	61.21	5.94
12	1015	349	970	0.38	21.50	6E-14	349	1042.5	72.51	6.96
13	1047	349	970	0.40	23.11	6E-14	349	1054.7	84.65	8.03
14	1079	349	970	0.43	24.69	0	349	1067.6	97.62	9.14
15	1111	349	970	0.46	26.23	0	349	1081.4	111.38	10.30
16	1143	349	970	0.48	27.73	6E-14	349	1095.9	125.90	11.49
17	1175	349	970	0.51	29.19	-6E-14	349	1111.2	141.15	12.70
18	1207	349	970	0.53	30.62	6E-14	349	1127.1	157.11	13.94
19	1239	349	970	0.56	31.99	0	349	1143.7	173.74	15.19
20	1271	349	970	0.58	33.33	1E-13	349	1161.0	191.01	16.45

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari penelitian yang telah dilakukan, beberapa hal yang dapat diambil sebagai kesimpulan antara lain:

1. Sebagian besar data pengukuran kecepatan konstan pada *focal length* 10 mm menunjukkan tingkat kesalahan relatif sebesar 15%, sedangkan pada *focal length* 22 mm sebesar 0%. Hal ini membuktikan bahwa efek distorsi pada *focal length* 10 mm masih cukup besar, sedangkan pada *focal length* 22 mm hampir tidak ada.
2. Pengukuran percepatan akan sulit dilakukan jika *focal length* yang digunakan menghasilkan *ultra-wide angle*. Hal tersebut terlihat ketika *focal length* 10 mm diaplikasikan pada penelitian ini, perubahan kecepatan akan sulit dibedakan penyebabnya antara efek distorsi atau murni akibat percepatan.
3. Distorsi yang berlaku pada *focal length* 10 mm mencapai 56% pada bagian tepi dan membentuk sudut sekitar 128° . Sedangkan pada *focal length* 22 mm hanya 16% dan sudut yang terbentuk sekitar 66° .
4. Semakin besar distorsi yang berlaku pada suatu *focal length* akan menghasilkan *error* yang besar pula, walaupun nilai *error* akan jauh lebih kecil daripada nilai distorsi karena adanya sistem *auto-correction* dari lensa itu sendiri.

5.2 Saran

Ada beberapa kendala yang dihadapi selama penelitian ini dilakukan. Selain itu, spesifikasi peralatan yang digunakan, baik perangkat fisik maupun lunak, juga memiliki keterbatasan. Oleh karena itu, penulis ingin memberikan beberapa saran demi

kebaikan penelitian-penelitian berikutnya. Adapun saran-saran tersebut antara lain:

1. Metode pengukuran kecepatan dan/atau percepatan seperti pada penelitian ini sebaiknya menggunakan *high-speed camera* agar proses analisis dapat lebih rinci dan teliti.
2. Penelitian serupa sebaiknya dilakukan menggunakan *focal length* yang termasuk dalam kategori normal (ekivalen 35-80 mm) karena baik hasil pengambilan gambar ataupun perekaman video relatif aman dari efek distorsi.
3. Penelitian yang melibatkan kamera sebagai alat bantu sebisa mungkin dilakukan di luar ruangan pada pagi hari karena intensitas cahaya pada waktu tersebut sangat sesuai untuk menghasilkan gambar dan/atau video yang bagus.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Gunawan, Wong Windra. 2009. **Rancang Bangun Software untuk Mengukur Kecepatan dan Percepatan Sebuah Partikel dengan Online Web Camera**. Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- [2] Christianto, Adi Wahyu. 2013. **Mengukur Kecepatan dan Percepatan Gerak Kaki Manusia Menggunakan Kamera Digital**. Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- [3] Abadi, Fajar. 2011. **Rancang Bangun Software untuk Mengukur Kecepatan dan Percepatan Sebuah Partikel dengan Frekuensi Tinggi Melalui Multimedia**. Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- [4] Karim, Saeful. 2008. **Belajar IPA Membuka Cakrawala Alam Sekitar**. Jakarta: Pusat Perbukuan Departemen Pendidikan Nasional.
- [5] Foster, Bob. 2004. **Terpadu Fisika SMA untuk Kelas XI Semester 2**. Jakarta: Erlangga.
- [6] Hawkins, Marcus. 2014. **Angle of View: How to Choose The Right Focal Length to Frame Your Image**. <URL: <http://www.digitalcameraworld.com/2014/11/13/angle-of-view-how-to-choose-the-right-focal-length-to-frame-your-image>>
- [7] Christiyanto, F. X. Ari. 2003. **Perancangan Gambar Obyek Tiga Dimensi dengan Teknik Flat Shading dan Gouraud Shading Menggunakan Bahasa Turbo Pascal 7.0**. Jurusan Matematika, Fakultas MIPA, Universitas Diponegoro.

- [8] Arfken, George. 1985. **Mathematical Methods for Physicists Third Edition**. Orlando, FL: Academic Press.
- [9] Goldstein, Herbert. 1980. **Classical Mechanics Second Edition**. Reading, MA: Addison-Wesley.
- [10] Hugemann, Wolfgang. 2010. **Correcting Lens Distortions in Digital Photographs**. Leverkusen, Germany: EVU.

BIODATA PENULIS



Penulis yang dilahirkan di Surabaya pada tanggal 17 Januari 1990 ini merupakan buah cinta pasangan Kusndaru Soejiwo Hartatik dan Sukarijono. Penulis memiliki seorang kakak laki-laki, seorang kakak perempuan, dan seorang adik perempuan. Penulis berhijrah ke Gresik setelah menetap selama empat tahun di kota kelahirannya. Penulis memulai pendidikan formalnya di TK Aisyiyah Bustanul Athfal 24 Gresik, kemudian melanjutkan di SDN Sidokumpul 2 Gresik. Penulis kemudian melanjutkan pendidikannya di SMPN 1 Gresik dan SMAN 1 Gresik. Setelah lulus dari SMA pada tahun 2008, penulis mengikuti SNM-PTN dan diterima di Jurusan Teknik Mesin ITS di tahun yang sama.

Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif sebagai pengurus Klub Pers Dimensi, sebuah lembaga minat bakat yang berfokus pada ranah kejournalistikan. Penulis juga pernah mengikuti Pelatihan Jurnalistik tingkat dasar dan lanjut, serta terlibat sebagai panitia acara bertema fotografi. Dari Klub Pers Dimensi inilah penulis banyak memperoleh ilmu yang bermanfaat di luar bangku kuliah.

Sebagai mahasiswa Teknik Mesin ITS, penulis lebih sering menjatuhkan pilihannya pada mata kuliah Bidang Studi Metalurgi. Namun karena ketertarikannya terhadap fotografi, penulis lebih memilih topik kinematika yang dikombinasikan dengan ilmu tentang optik sebagai penelitian Tugas Akhirnya. Kinematika sendiri merupakan bagian dari Bidang Studi Desain Teknik Mesin ITS.